LA TECHNOLOGIE DES CHEMINS DE FER AU VINGTIÈME SIÈCLE

(traduction)

Préparé par
R.S. Wallace & Associates Limited

COMMISSION CANADIENNE DES TRANSPORTS
Direction de la recherche
Rapport n° 1982/10F
Mars 1981

Original English text available -
"Rail Technology in the Twentieth Century",
Report No. 1982/10E

Premier tirage, mars 1983

Commission canadienne des transports
15, rue Eddy, 15e ét., Ottawa-Hull K1A 0N9

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1983
Numéro de catalogue TT72-1982/10F
ISBN 0-662-91878-9

Imprimé au Canada

Commission canadienne des transports
Canadian Transport Commission

PRÉFACE

En 1978, la Commission a parrainé une étude effectuée par R.S. Wallace and Associates et intitulée: Transport par camion et par chemin de fer: perfectionnements technologiques prévus d'ici 1990. En raison de l'intérêt soulevé par ce travail, il a été décidé de demander à la même firme de préparer une étude sur "la technologie des chemins de fer au vingtième siècle", qui passe en revue les progrès techniques et les problèmes actuels des chemins de fer.

Le rapport examine six grands domaines, à savoir les locomotives, les carburants, l'électrification, les wagons à marchandises, les gares de triage et les rails. Chaque section présente l'évolution historique depuis 1945, examine les plus récentes techniques et précise certaines innovations qui sont prévues dans un proche avenir. On examine également les rapports entre la technologie et les progrès techniques. Enfin, un dernier chapitre présente certains scénarios concernant l'évolution future.

Le présent rapport est publié à titre de contribution aux discussions publiques sur l'importante question des progrès techniques dans le domaine du transport. Les opinions exprimées par ses auteurs ne reflètent pas nécessairement les vues de la Commission canadienne des transports.

Le vice-président à la recherche,

Yves Dubé

Canada

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. R.P. Rennie, chef de la Recherche au Canadien National, qui a bien voulu nous communiquer ses opinions et observations sur les progrès techniques dans l'industrie ferroviaire. Nous aimerions également remercier CP Rail News et la Division des produits ferroviaires et diesel de Bombardier Inc., qui nous ont fourni certaines des illustrations utilisées dans le rapport. Enfin, nous transmettons nos remerciements à MM. P.D. Lyall et P.R. Panke, qui ont été les principaux recherchistes du projet.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE 1

Chapitre 1 INTRODUCTION 7

1.1 Généralités 7
1.2 Autorisation 8
1.3 Justification et portée du rapport 8
1.4 Limites 8
1.5 Sources d'information 8
1.6 Organisation de l'étude 8
1.7 Résumé des conclusions 9

Chapitre 2 LOCOMOTIVES 11

2.1 Aperçu général 11
2.2 Évolution de la locomotive depuis 1945 11
2.3 Moteurs primaires 23
2.4 Rendement énergétique 30
2.5 Entretien et fiabilité 37
2.6 Locomotives réusinées 40
2.7 Adhérence des locomotives 42
2.8 Traction à courant alternatif 46
2.9 Locomotives télécommandées 48
2.10 Autres composantes 52
2.11 Résumé 54

Chapitre 3 CARBURANTS DE RECHANGE 57

3.1 Introduction 57
3.2 Historique 57
3.3 Carburants hybrides 58
3.4 Carburants de remplacement 59
3.5 Carburants hors spécifications 61
3.6 Carburants synthétiques 61
3.7 Résumé 62

Chapitre 4 ÉLECTRIFICATION 65

4.1 État de la question 65
4.2 Facteurs en faveur de l'électrification 66
4.3 Arguments contre l'électrification 67
4.4 Coût de l'électrification 69
4.5 Résumé 71

Chapitre 5	WAGONS À MARCHANDISES		73
	5.1	Introduction	73
	5.2	Histoire générale de l'évolution des wagons à marchandises	73
		5.2.1 Wagons couverts	73
		5.2.2 Wagons-tombereaux	74
		5.2.3 Wagons-trémies	74
		5.2.4 Wagons-citernes	81
		5.2.5 Wagons plats	83
	5.3	Tendances actuelles	84
		5.3.1 Examen des statistiques	84
		5.3.2 Wagons couverts	90
		5.3.3 Wagons-tombereaux	95
		5.3.4 Wagons-trémies	97
		5.3.5 Wagons-citernes	97
		5.3.6 Wagons plats	100
		5.3.7 Innovations européennes	101
		5.3.8 Aérodynamique	102
	5.4	Quelques innovations du transport intermodal	102
		5.4.1 Wagons plats articulés	102
		5.4.2 Wagons-remorques	103
		5.4.3 Transport de conteneurs/remorques sur wagon plat à deux étages	105
		5.4.4 Croissance du service de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat	106
	5.5	Bogies de wagons	106
	5.6	Progrès futurs	110
	5.7	Résumé	111
Chapitre 6	SYSTÈMES DE COMMANDE DE LA CIRCULATION		113
	6.1	Introduction	113
	6.2	Commande centralisée de la circulation	113
		6.2.1 Évolution générale	113
		6.2.2 La British Columbia Railroad: une application canadienne	115
	6.3	Commande automatique des trains	116
	6.4	Identification automatique des véhicules	117
	6.5	Tendances futures	118
	6.6	Résumé	119
Chapitre 7	GARES DE TRIAGE		121
	7.1	Introduction	121
	7.2	Évolution	121
	7.3	Gares de triage modernes	122
	7.4	Innovations européennes et japonaises	125
	7.5	Tendances futures	127
	7.6	Résumé	128

Chapitre 8	VOIES FERRÉES ET ÉQUIPEMENT D'ENTRETIEN		129
	8.1	Introduction	129
	8.2	Historique	129
	8.3	Voies électrifiées	131
	8.4	Rails	131
	8.5	Équipement d'entretien	132
	8.6	Traverses de béton	135
	8.7	Rail à base continue	136
	8.8	Géotextiles	137
	8.9	Résumé	137
Chapitre 9	TENDANCES DE LA PRODUCTIVITÉ		139
	9.1	Introduction	139
	9.2	Étude des tendances	139
	9.3	Résumé	147
Chapitre 10	LE MILIEU DE DEMAIN ET SES EFFETS SUR LA TECHNOLOGIE		151
	10.1	Scénarios de l'évolution du chemin de fer	151
	10.2	Facteurs influant sur le milieu futur du chemin de fer	151
	10.3	Scénario le plus probable	154
		10.3.1 Description	154
		10.3.2 Changements technologiques	155
RÉFÉRENCES			157
APPENDICES			165
A	Glossaire		167
B	Tableaux des tendances de la productivité		169

TABLEAUX

2.1	Locomotives de marchandises actuellement en usage en Amérique du Nord	20
2.2	Cycles normaux de consommation de carburant et d'utilisation pour une locomotive diesel-électrique universelle à quatre essieux	33
2.3	Répartition de l'énergie thermique provenant du carburant diesel	38

4.1	Estimations de la FRA concernant les investissements et les économies attribuables à l'électrification	70
5.1	Wagons à marchandises en service au Canada, 1974-1978	87
8.1	Longueur du réseau exploité au Canada, 1945-1978	130

FIGURES

2.1	Nombre de locomotives en usage au Canada selon la force motrice, 1942-1978	13
2.2	Augmentations de la puissance et du prix des locomotives diesel-électriques	15
2.3	Plan général d'une locomotive de marchandises à six essieux	17
2.4	Plan général d'une locomotive de marchandises à quatre essieux	19
2.5	Locomotives commandées pour l'Amérique du Nord, 1975-1979	22
2.6	Diesel EMD, modèle 645F	25
2.7	Locomotive bimodale	27
2.8	Système de stockage de l'énergie le long des voies (WESS)	29
2.9	Énergie consommée par le service de transport de marchandises à force motrice au Canada, 1953-1978	31
2.10	Frais d'entretien des locomotives	39
2.11	Effort de traction contre vitesse	43
2.12	Avantages des locomotives télécommandées pour accroître la longueur des trains en hiver	50
2.13	Diagramme de la force des attelages d'un système 4-5-4 tirant 130 wagons sur une pente de 2,2 %	51
5.1	Plan de wagon couvert	75
5.2	Plan de wagon-tombereau	77

5.3	Plan de wagon-trémie couvert	79
5.4	Wagon-citerne tous usages DOT 111A 100W-1 avec serpentins de réchauffage et sans revêtement isolant	82
5.5	Wagons-citernes appartenant aux compagnies de chemin de fer ou loués par celles-ci	83
5.6	Wagon plat tous usages	85
5.7	Wagons à marchandises en service, 1945-1978	84
5.8	Wagons-milles chargés et vides transportés par année, 1969-1978	91
5.9	Capacité moyenne d'un wagon à marchandises, 1930-1978	92
5.10	Courbe du trafic, chemins de fer publics au Canada, 1961-1978	93
5.11	Wagon couvert à porte large	94
5.12	Wagon-tombereau déversant des copeaux par l'extrémité	95
5.13	Wagon à charbon de 100 tonnes à déchargement automatique	98
5.14	Wagon-citerne à écoulement double de Procor	99
5.15	Wagon plat à billots	100
5.16	Wagon-remorque	103
5.17	Bogie de wagon à deux essieux	107
5.18	Bogie à parallélogrammes	109
5.19	Bogie autodirecteur	109
6.1	Système de détection-identification-contrôle	116
7.1	Gare de triage automatisée à butte	124
7.2	Système de tracteur à cordes	126
8.1	Dégarnisseuse à ballast	134
9.1	Tonnes-milles par employé, 1945-1978	140
9.2	Tonnes-milles par million de B.T.U., 1953-1978	142

9.3	Tonnes-milles par wagon à marchandises, 1945-1978	143
9.4	Capacité et charge moyennes des wagons à marchandises, 1945-1978	144
9.5	Tonnes-milles par locomotive, 1945-1978	146
9.6	Tonnes-milles par mille de voies exploitées, 1945-1978	148

SOMMAIRE

L'étude de la technologie des chemins de fer au vingtième siècle donne un bon aperçu de l'évolution historique et future des progrès techniques accomplis dans l'industrie ferroviaire. Elle vise à mettre à jour et à compléter la partie consacrée aux chemins de fer dans une étude réalisée en 1978, intitulée "Transport par camion et par chemin de fer: perfectionnements technologiques prévus d'ici 1990". Le rapport examine six grands domaines, à savoir les locomotives, les carburants, l'électrification, les wagons à marchandises, les gares de triage et les rails. Chaque partie présente l'évolution historique depuis 1945, examine les plus récentes techniques et précise certaines innovations qui sont prévues dans un proche avenir. Une section distincte analyse les tendances de la productivité ainsi que ses rapports avec les progrès techniques. Enfin, un dernier chapitre émet des hypothèses concernant l'orientation des progrès futurs à long terme en fonction d'un certain nombre de scénarios et de facteurs déterminants.

Les principaux points du rapport, dans l'ordre où ils sont présentés dans le rapport, se résument comme suit:

Locomotives

Depuis la mise en service des premières locomotives diesel-électriques au Canada en 1948, quelque 3 100 unités diesel ont rapidement remplacé 5 000 moteurs à vapeur comme sources de puissance motrice. Avec l'avènement du turbocompresseur actionné par gaz d'échappement en 1959, la deuxième génération de diesels a fait un bond en avant sur le plan de la puissance. On a cherché à accroître la puissance jusqu'à ce que les prix du carburant commencent à augmenter rapidement en 1973. Les innovations plus récentes ont visé à améliorer l'économie de carburant, la fiabilité et l'entretien plutôt qu'à accroître la puissance.

Les locomotives actuelles de la troisième génération, qui coûtent environ 950 000 $ chacune, ont permis de réaliser une économie de carburant de 7 % par rapport aux modèles précédents. Cette économie représente à peu près 2 100 gallons de carburant par année pour chaque locomotive. Des économies supplémentaires de 2 % sont possibles grâce à des moteurs plus perfectionnés, des locomotives possédant une meilleure traction, des méthodes d'exploitation améliorées et un meilleur système d'entretien et de formation. La conception des locomotives continuera d'évoluer à mesure que les modèles actuels deviendront plus automatisés et que la technologie améliorera l'interface entre l'ordinateur et le matériel. Le rôle du conducteur consistera de plus en plus à surveiller le

fonctionnement des machines et à assurer au besoin une relève manuelle.

Les techniques à plus long terme comprennent le développement de locomotives électriques/diesel-électriques bimodales, de systèmes de stockage de l'énergie le long de la voie, de locomotives diesel actionnées par des carburants de remplacement et de turbines à cycle de Rankine pour récupérer l'énergie des gaz d'échappement.

Carburants de rechange

Parmi les carburants de rechange qui peuvent être utilisés pour les moteurs diesel, il y a lieu de mentionner les carburants hybrides, les carburants de remplacement, les carburants hors spécifications (ou combinés dans une large coupe) et les carburants synthétiques. Les carburants synthétiques tirés des sables bitumineux satisfont déjà à 6 % de la demande ferroviaire et n'exigent pas de modification des moteurs. Les carburants diesel hors spécifications peuvent accroître de 5 % le rendement des raffineries et peuvent être utilisés sans aucune modification des moteurs ou quelques modifications mineures. Les carburants hybrides, comme les mélanges d'alcool et de diesel, peuvent satisfaire jusqu'à 32 % des besoins énergétiques des moteurs, moyennant des modifications mineures aux moteurs. La consommation spécifique de carburant s'accroîtrait d'environ 16 % car l'enthalpie de l'alcool n'équivaut qu'à la moitié de celle du carburant diesel. Des prototypes de carburants hybrides devraient être en usage d'ici 1985. Les carburants de remplacement, qui remplacent le carburant diesel, nécessiteront d'importantes modifications aux moteurs. À long terme, l'hydrogène constitue le carburant de remplacement le plus prometteur car il laisse peu de déchets en brûlant, ne provient pas des charges d'alimentation pour l'industrie du pétrole et son enthalpie est le double de celle du carburant diesel.

Les approvisionnements futurs de carburant pour le transport en général comprendront probablement divers types de carburants plutôt qu'un seul type dominant. Cependant, l'industrie ferroviaire favorisera un nombre limité de carburants de rechange afin de standardiser l'équipement et les installations.

Électrification

L'électrification des lignes principales des chemins de fer du Canada semble maintenant n'être plus qu'une question de temps. Les sociétés ferroviaires elles-mêmes sont généralement en faveur de la conversion si elles peuvent régler le problème que pose le coût en capital. Les estimations des coûts varient considérablement, mais sont de l'ordre de 1 000 000 $ le mille

pour l'équipement de la force motrice et le matériel fixe. Les économies annuelles au chapitre du coût de l'énergie, de la maintenance et des coûts du cycle de vie des locomotives sont évaluées à 70 000 $ le mille. Cela représente un rendement de 7 % sur les coûts de 1 000 000 $ le mille que nécessite l'électrification, et démontre clairement que l'électrification n'est pas justifiée uniquement sur le plan des économies de carburant. L'électrification des lignes principales à circulation dense peut permettre de réduire la consommation de carburant diesel de 50 %, soit 270 millions de gallons par année. Le moment le plus probable pour le début de l'électrification est le milieu des années 1990.

Wagons à marchandises

Les modèles actuels ne dépasseront probablement pas un poids brut de 265 000 livres à moins qu'on ne se tourne vers le wagon à six essieux, car la charge par essieu est maintenant à son maximum. Une réduction de 4 ou 5 tonnes du poids à vide et une utilisation intense des wagons à marchandises peuvent accroître leur productivité par tonne-mille de quelque 10 % dans un proche avenir. Les nouveaux wagons plats articulés peuvent économiser jusqu'à 300 000 gallons américains par année pour un seul train de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat. Des remorques multimodales (rail-route) sont en train d'être éprouvées pour le service payant et promettent d'autres économies de carburant et réductions des coûts en capital.

Les wagons classiques pour le transport de conteneurs/remorques sur wagon plat pourraient évoluer suivant deux unités distinctes, conçues pour le transport des conteneurs ou des remorques, mais non les deux.

En raison de leur poids plus léger, les nouveaux wagons plats articulés peuvent réduire la consommation de carburant de 25 %, comparativement aux wagons plats classiques. Les wagons-remorques, qui sont des remorques rail-route multimodales, peuvent réduire la consommation de carburant de 50 %, par rapport aux wagons plats classiques. Les unités, qui coûtent environ 33 000 $ chacune, permettent une économie d'argent importante comparativement aux wagons plats.

Systèmes de commande de la circulation

Dans le domaine des systèmes de commande de la circulation, l'ordinateur représente l'élément clé de l'évolution future. Il permet d'accroître la capacité des systèmes sans avoir recours à des investissements considérables. En réduisant la distance entre les trains, on accroît la capacité de la ligne. L'ordinateur prend également à sa charge bon nombre des tâches routinières, ce qui permet aux régulateurs de consacrer plus de temps aux fonctions plus importantes de la commande de

la circulation, augmentant ainsi la sécurité et l'efficacité. Le système de commande de la circulation sera l'un des plus importants progrès de l'avenir.

Les ordinateurs à bord des locomotives contribueront à améliorer le contrôle des trains, à mieux détecter les dérangements et à réduire l'écart entre les trains lorsqu'ils seront utilisés de concert avec les détecteurs et les émetteurs le long des voies.

Des systèmes automatiques d'identification des wagons seront instaurés dans un proche avenir; ils utiliseront des émetteurs passifs ou actifs sur les wagons à marchandises afin de surmonter les problèmes de fiabilité qu'occasionnaient les anciens détecteurs à cellule photo-électrique.

Gares de triage

Dans le domaine du triage, la gare à butte actuelle demeurera en Amérique du Nord. L'automatisation des gares s'accroîtra grâce à différentes applications des ordinateurs. Il en résultera une réduction du temps de séjour des wagons dans les terminaux, un accroissement de la capacité des gares et une diminution des activités de main-d'oeuvre.

Les gares informatisées modernes, par exemple, peuvent facilement réduire de 18 à 12 heures la durée du séjour des wagons dans les terminaux. Les progrès futurs porteront sur les processus industriels qui assurent une interface entre l'ordinateur et le matériel dans la gare de triage. D'autre progrès futurs comprendront notamment des wagons avec des conduites de frein à accouplement automatique et des locomotives de manoeuvre télécommandées.

Rails

On utilise actuellement de longs rails soudés et des traverses de béton pour remplacer les voies dans les pentes et les courbes prononcées. On estime que les traverses de béton durent 50 ans, comparativement à 30 ans pour celles en bois. De plus la traverse de béton réduit de 30 % les coûts de l'entretien.

Des géotextiles sont maintenant employés là où l'eau constitue un problème sur l'infrastructure de la voie. Ces matières agissent comme des mèches qui attirent l'eau sur les côtés de la voie.

D'énormes machines, capables de soulever les anciennes voies et traverses, d'exécuter toutes les fonctions relatives à la maintenance et de poser les nouveaux rails et les traverses de béton en une seule opération, ont prouvé leur efficacité. On

estime jusqu'à 3 000 000 $ par année les économies réalisées au chapitre du remplacement des rails. Des machines mobiles plus petites, pouvant rouler sur route et sur rail, seront de plus en plus utilisées pour assurer l'entretien périodique entre les grands travaux de remplacement des voies. À l'avenir, l'équipement de maintenance des voies sera conçu de manière à être plus simple, plus fiable, plus automatisé et, par-dessus tout, plus rapide afin de pouvoir effectuer les travaux d'entretien malgré le nombre croissant des déplacements de trains.

Tendances de la productivité

Le tableau de la page suivante montre la productivité accrue de différents secteurs pour les années 1945, 1962 et 1978, ainsi que les facteurs déterminants.

Perspectives à long terme

Les facteurs externes qui influent sur les progrès techniques dans l'industrie ferroviaire sont notamment l'énergie, les capitaux, la main-d'oeuvre, la demande de services de transport, les politiques du gouvernement, la réglementation et la sécurité. L'énergie représente le facteur le plus important. Ce facteur déterminera très probablement la politique sur l'électrification, l'avenir du développement d'autres carburants, et favorisera la recherche sur les techniques de rendement énergétique. Les capitaux constituent le deuxième facteur en importance. Dans une industrie de capital comme celle des chemins de fer, les nouvelles techniques qui se sont révélées efficaces ne seront pas mises en oeuvre s'il n'y a pas de capitaux.

AUGMENTATIONS DE LA PRODUCTIVITÉ

Secteur	1945	1962	1978	Facteurs déterminants
Main-d'oeuvre (tonnes-milles/ employé)	300 000	400 000	1 200 000	Employés prenant leur retraite, diésélisation.
Énergie (tonnes-milles/ million de B.T.U.)	376	1 512	1 900	Diésélisation, forte capacité des wagons, perfectionnements actuels des locomotives.
Wagons à marchandises (tonnes-milles/ wagon)	388 000	326 000	750 000	Capacité plus élevée, meilleurs facteurs de charge, utilisation accrue, poids à vide moins élevé.
Locomotives (tonnes-milles annuelles/ locomotive)	14 000 000	17 700 000	34 000 000	Diésélisation, meilleure disponibilité, turbocompression, amélioration de l'effort de traction, capacité plus forte des wagons.
Rails (tonnes-milles annuelles/mille)	1 000 000	1 100 000	2 400 000	Abandon des lignes à faible circulation, trains plus lourds, commande centralisée de la circulation.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités

Le présent rapport a été préparé en vue de compléter et de mettre à jour la partie consacrée aux chemins de fer dans une étude antérieure effectuée en 1978 et intitulée: Transport par camion et par chemin de fer: perfectionnements technologiques prévus d'ici 1990. Ce nouveau rapport a pour but de donner un aperçu des progrès techniques réalisés ainsi que des répercussions, de la date et de la probabilité de leur mise en oeuvre dans l'industrie du transport de marchandises par chemin de fer. La période visée va de la fin de la Seconde Guerre mondiale à l'année 2000. L'analyse est axée sur les innovations qui sont actuellement au stade des essais et qui peuvent être mises en oeuvre au cours des dix prochaines années. Le but n'est pas de fournir une description détaillée des techniques, mais plutôt un aperçu de "ce qu'elles sont, ce qu'elles font et ce qu'elles produisent".

Les principaux sujets abordés sont les locomotives, les carburants de remplacement, l'électrification, les wagons à marchandises, la commande centralisée de la circulation, les rails et les gares de triage. Le rapport contient également des chapitres sur les tendances de la productivité en ce qu'elles ont trait aux progrès techniques et sur l'orientation des changements technologiques à long terme dans la mesure où ils se rapportent à différents scénarios et facteurs déterminants.

On a toujours hésité à intégrer de nouvelles techniques dans des parcs fortement standardisés de matériel ferroviaire. Dans un secteur où les locomotives durent environ 20 ans et les wagons sont utilisés pendant 30 ans, la technologie a évolué lentement. Cette évolution s'est faite de façon graduelle. Par exemple, les locomotives d'aujourd'hui représentent en fait des versions plus raffinées des mêmes unités qui ont été introduites en 1948.

Cependant, le milieu des chemins de fer a changé depuis cinq ans. Les sociétés ferroviaires sont de plus en plus réceptives aux innovations. En particulier, d'importantes études sont en cours sur les applications de l'informatique au transport ferroviaire. Les nouvelles techniques électroniques abondent dans l'industrie. La principale restriction est la disponibilité des capitaux pour mettre en oeuvre ces innovations.

1.2 Autorisation

La présente étude a été autorisée par la Direction de la recherche de la Commission canadienne des transports en vertu du contrat n° 0-8340 passé le 25 novembre 1980 avec la société d'experts-conseils R.S. Wallace & Associates Limited.

1.3 Justification et portée du rapport

Le rapport vise à faire mieux comprendre les possibilités actuelles et futures du transport de marchandises par chemin de fer au sein de l'industrie canadienne des transports. Il aborde les progrès techniques accomplis dans ce secteur depuis 1945. Il examine les plus récentes techniques et celles qui sont prévues dans un proche avenir, et émet certaines hypothèses sur l'évolution à long terme dans le cadre de certains scénarios.

En raison de certaines restrictions, il n'a pas été possible d'examiner dans tous les détails certains développements. Le rapport examine plutôt un grand nombre de sujets d'une façon générale. Comme tel, le rapport intéressera ceux qui sont chargés de diriger et de réglementer l'industrie du transport de marchandises par chemin de fer.

Le rapport décrit la technologie et ses incidences sur l'industrie, du point de vue des sociétés ferroviaires.

1.4 Limites

L'effort correspondant à quelque trois mois-personne consacrés à cette étude limite la profondeur de l'analyse de chacun des sujets abordés. En restant dans les perspectives de l'étude, on a cherché à donner un aperçu des changements technologiques.

1.5 Sources d'information

L'examen de la gamme étendue de sujets de cette étude a été fait à partir d'informations provenant d'une gamme non moins vaste de sources. Les principales sources publiées figurent dans la liste des références se trouvant à la fin de ce rapport. De plus, des renseignements ont été rassemblés lors de visites et de conversations téléphoniques avec des chercheurs spécialisés dans l'industrie ferroviaire.

1.6 Organisation de l'étude

Ce premier chapitre présente les objectifs et la portée de l'étude, ainsi que la déclaration autorisant l'étude, ses limites, ses sources d'information et son type de présentation.

Les chapitres 2 à 8 portent sur les locomotives, les carburants de rechange, l'électrification, les wagons à marchandises, les systèmes de commande de la circulation, les gares de triage et les rails. Chaque chapitre expose l'historique de l'évolution, les techniques les plus récentes et les perfectionnements qui sont prévus dans un domaine particulier de l'industrie. Le chapitre 9 établit un rapport entre les tendances de la productivité au sein du transport de marchandises par chemin de fer et les progrès techniques sur une longue période de temps. Le chapitre 10 présente les perspectives à long terme pour les types de techniques qui surgiront selon divers scénarios et certains facteurs déterminants sur l'environnement.

1.7 Résumé des conclusions

Les principaux points du rapport se résument comme suit:

a) Le développement de la locomotive se poursuivra de façon évolutive et les économies de carburant atteindront graduellement le niveau de 2 % par année. Les locomotives futures seront de plus en plus contrôlées automatiquement à mesure que les ordinateurs assumeront un nombre croissant de responsabilités pour le fonctionnement des trains.

b) Les autres carburants qui peuvent être utilisés dans les moteurs diesel prennent diverses formes qui exigent, à divers niveaux, des modifications des moteurs. Les effets à long terme sur les moteurs et les modifications du matériel font l'objet de recherches constantes. Des prototypes de carburants hybrides devraient être en usage d'ici 1985.

c) L'électrification semble maintenant n'être plus qu'une question de temps. Les sociétés ferroviaires sont généralement en faveur d'une conversion à l'électricité si elles peuvent régler la question du coût en capital initial. Le processus d'électrification pourrait débuter en 1995.

d) Les wagons à marchandises sont maintenant conçus pour supporter une charge maximale par essieu et les concepteurs cherchent à obtenir des charges plus élevées en réduisant les poids à vide. Une meilleure utilisation, des séjours plus courts dans les terminaux et des facteurs de charge plus élevés permettront d'obtenir une productivité plus élevée par tonne-mille. Les wagons plats articulés de poids léger seront probablement la prochaine étape dans le domaine du transport de remorques/

conteneurs sur wagon plat. Les remorques intermodales rail-route donnent de bons résultats dans les tests préliminaires et devraient devenir de plus en plus populaires comme solution de rechange efficace et peu coûteuse aux wagons rail-route.

e) Les systèmes de commande de la circulation utiliseront un plus grand nombre d'applications de l'ordinateur en vue d'accroître la capacité des lignes sans recourir à des investissements considérables. Il en résultera une plus grande sécurité dans les secteurs à circulation dense.

f) Les gares de triage s'automatisent de plus en plus en vue d'accroître la capacité, de réduire la main-d'oeuvre et de diminuer le temps de séjour dans les terminaux.

g) À l'avenir, les voies ferroviaires utiliseront davantage de traverses de béton et d'aciers alliés afin de réduire les exigences de la maintenance sur les lignes à circulation dense. L'équipement d'entretien se transformera à la fois en énormes machines capables de remplacer les voies en une seule opération et en machines mobiles rail-route plus petites pour effectuer des travaux d'entretien périodiques. L'évolution de l'équipement d'entretien tiendra compte de l'importance de réduire le temps passé sur les voies.

h) La productivité de la main-d'oeuvre s'est accrue par un facteur de quatre depuis 1945. Le passage de la vapeur au diesel et le nombre réduit d'employés ont occasionné cette augmentation. Dans d'autres secteurs, le rendement énergétique a également accusé une augmentation au sextuple en raison de la diésélisation et, plus récemment, des économies de carburant qui ont pu être réalisées dans le fonctionnement des locomotives et des trains.

i) Dans le milieu ferroviaire de demain, l'énergie constituera le plus important facteur des recherches en vue de trouver des conceptions plus économiques dans le domaine des carburants et de nouveaux concepts dans le domaine de l'énergie. La disponibilité des capitaux sera un important facteur pour la mise en oeuvre des innovations.

Chapitre 2

LOCOMOTIVES

2.1 Aperçu général

Ce chapitre débute par un bref aperçu de l'évolution de la locomotive depuis la Seconde Guerre mondiale. Vient ensuite un examen de l'évolution historique et future de certains composants précis et systèmes secondaires des locomotives. Les progrès techniques, ainsi que leur importance et leur mise en oeuvre, sont décrits de façon générale. On traite également des progrès connexes accomplis dans les domaines suivants:

a) moteurs primaires,

b) rendement énergétique,

c) entretien et fiabilité,

d) locomotives réusinées,

e) adhérence (traction),

f) traction à courant alternatif,

g) rames télécommandées, et

h) autres composantes de locomotive.

Presque toutes les locomotives en usage en Amérique du Nord proviennent de trois fabricants: la compagnie canadienne Bombardier Inc. (anciennement Montreal Locomotive Works) et deux fabricants américains, General Motors (Division électromotrice) et General Electric (Division diesel).

Ce chapitre présente trois générations de locomotives: d'abord, les premières unités de 1 500 hp introduites en 1948, puis les générations subséquentes à mesure que les locomotives sont remplacées après environ 15 ans de service.

2.2 Évolution de la locomotive depuis 1945

L'histoire de la force motrice ferroviaire montre bien comment des innovations techniques peuvent révolutionner une industrie importante. La force motrice à la vapeur a dominé les débuts du chemin de fer au Canada, depuis l'inauguration d'une ligne de 16 milles entre Saint-Jean et Laprairie (Québec) en

1836. À l'époque de la Confédération en 1867, il existait 2 500 milles de voies ferrées desservies par les locomotives à vapeur des compagnies du Grand-Tronc et Great Western Railways.

Les premiers moteurs diesel étaient des locomotives de manoeuvre de 600 hp introduites en 1938 par les Chemins de fer nationaux du Canada. À l'époque, on estimait que ces unités à entraînement mécanique ne représentaient qu'une utilité limitée. Cette situation a cependant changé avec l'apparition des locomotives diesel-électriques, lesquelles utilisaient le moteur diesel pour faire tourner une génératrice qui, à son tour, fournissait du courant à des moteurs de traction à chaque essieu de la locomotive.

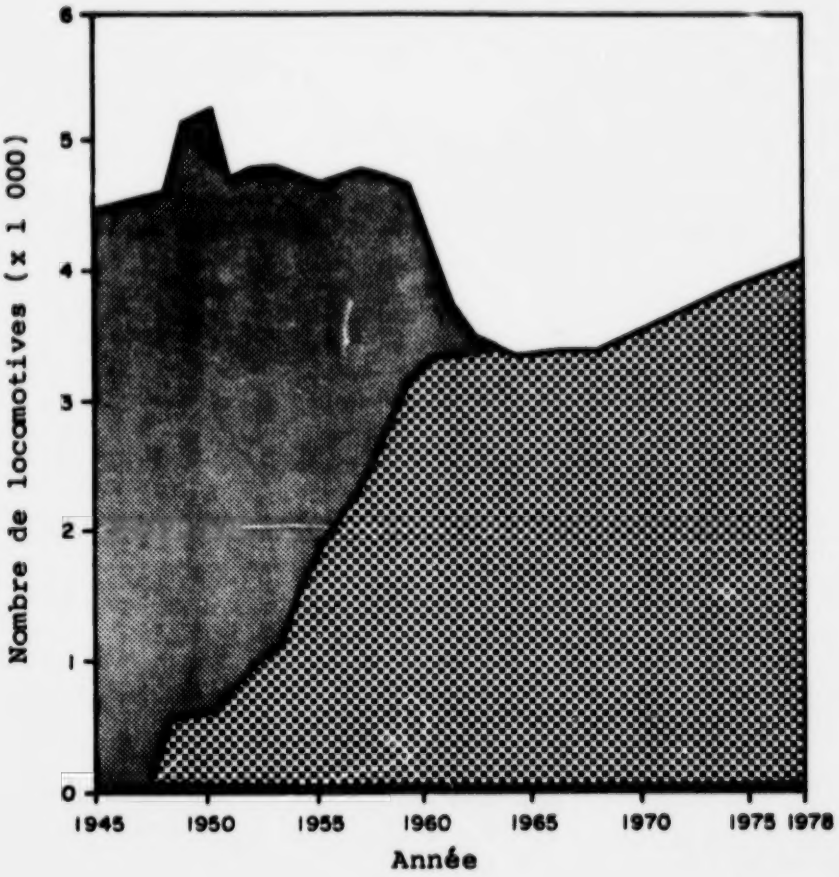
En 1948, des locomotives diesel-électriques de 1 500 hp de la première génération, fabriquées par General Motors, sont apparues en Amérique du Nord. Cet événement a signalé le commencement de la fin pour la traction à vapeur. De 1948 à 1962, quelque 5 000 locomotives à vapeur ont été remplacées par 3 000 unités diesel-électriques (voir la figure 2.1). En 1978, le trafic ferroviaire du Canada a été acheminé par 4 057 unités diesel [2]. Au cours de la même période, le rendement, mesuré en tonnes-milles de marchandises payantes, est passé de 58 milliards en 1948 à 137 milliards en 1978 [3],[4],[5].

La rapidité de cette révolution s'explique par le fait que l'investissement requis pour produire des moteurs diesel serait rapidement remboursé grâce aux économies de carburant que permettait la plus grande efficacité du cycle diesel. Au niveau du rendement thermique, la locomotive diesel utilisait le carburant avec une efficacité six fois plus grande que la puissance thermique existante. D'autres avantages, notamment la réduction de la maintenance des locomotives, l'élimination des installations de service des locomotives à vapeur et le ralentissement de l'usure du champignon des rails, n'avaient pas été prévus mais se sont révélés encore plus intéressants à mesure que la conversion progressait.

Le passage au diesel n'a toutefois pas apporté que des avantages. Les employés qui travaillaient au service de l'eau, à la maintenance des locomotives et à la fabrication ont découvert que leurs compétences n'étaient plus requises. À bord des locomotives, on a conservé au début l'équipage de trois hommes (mécanicien, chauffeur et serre-freins) [1]. Cependant, la collaboration entre la direction et les syndicats a permis d'éliminer graduellement par attrition le rôle du chauffeur, qui était devenu superflu.

Figure 2.1

NOMBRE DE LOCOMOTIVES EN USAGE AU CANADA
SELON LA FORCE MOTRICE, 1942-1978



Les locomotives diesel de manoeuvre ont été introduites en 1938, puis ont été suivies de la première locomotive de ligne diesel en 1948. Son utilisation s'est accrue rapidement jusqu'à ce que les dernières locomotives à vapeur disparaissent de la circulation en 1962.

Source: [3]

N'ayant plus à effectuer de fréquents arrêts pour se réapprovisionner en carburant et en eau, les locomotives diesel étaient capables d'aller beaucoup plus loin que leurs pendants à vapeur. Cependant, les équipes des trains continuèrent pendant de nombreuses années d'être rémunérées en fonction d'une journée de huit heures ou de cent milles. Des problèmes de ce genre ont fait que bon nombre des économies de coûts que permettait la conversion ne se sont jamais traduites par des profits additionnels pour les sociétés ferroviaires ou des salaires plus élevés pour les employés.

La première génération de diesels de ligne principale utilisait des moteurs de 1 500 à 1 750 hp, les plus puissants qui existaient alors [6]. Lorsque les sociétés ferroviaires jugèrent plus économique de manier des trains plus longs et plus lourds, il devint nécessaire d'utiliser plusieurs de ces locomotives pour tirer les charges plus lourdes.

De toute évidence, des économies substantielles seraient possibles si ces nombreuses petites locomotives pouvaient être remplacées par un nombre moins élevé d'unités plus grandes. L'innovation technique qui a permis de franchir cette étape a été le turbocompresseur à gaz d'échappement, mis au point au milieu des années 1950. Introduit en 1959, ce dispositif était tout simplement un ventilateur actionné par l'impulsion donnée par les gaz d'échappement. Il fournissait davantage d'air au moteur sous pression, accroissant ainsi la puissance du moteur. Grâce à la turbocompression et à d'autres perfectionnements, la puissance maximale du moteur a pu être plus que doublée. Ces progrès ont rendu possible la "deuxième génération" de diesels, d'une puissance nominale d'environ 3 000 hp. Ils ont fait leur apparition au moment où il fallut commencer à remplacer les unités de la première génération en 1960. Au cours des vingt dernières années, la fonction de l'industrie de la locomotive diesel a été de remplacer la "première génération" des diesels. Il arrive souvent qu'une nouvelle unité remplace deux unités de la première génération. Ces derniers temps, la hausse des taux d'intérêt et des coûts de la main-d'oeuvre a nécessité le réusinage en masse d'anciennes unités pour les rendre conformes aux spécifications actuelles, à un coût qui se situe entre 20 et 50 % du prix d'une nouvelle unité.

Par suite de l'introduction des diesels de la deuxième génération, le parc de locomotives ne s'est accru que de 26 % depuis 1960 alors que le travail exécuté, mesuré en tonnes-milles, a augmenté de 128 % au cours de la même période [3],[4], [5].

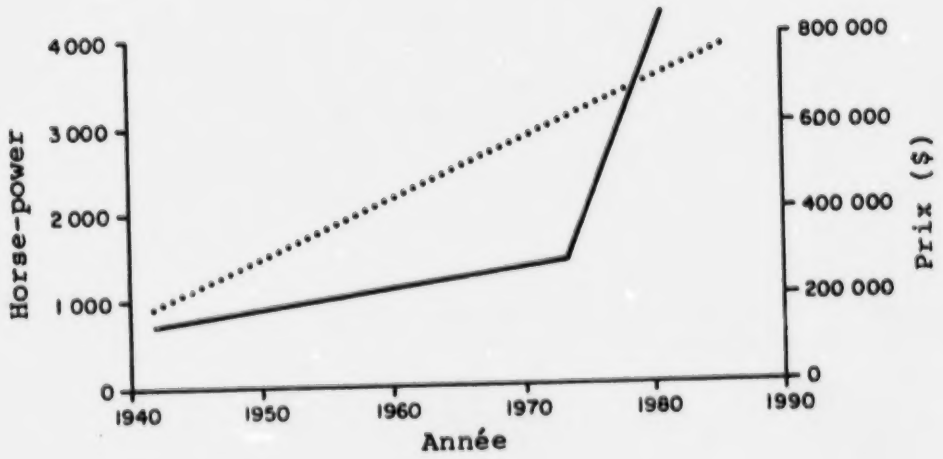
Les locomotives de la troisième génération qui sont actuellement livrées représentent une version améliorée des locomotives diesel-électriques originales. Les principales caractéristiques des unités de la troisième génération sont les suivantes: diminution de la consommation de carburant tout en

maintenant ou même en augmentant la puissance, et large utilisation des microprocesseurs pour contrôler le fonctionnement des trains et l'adhérence aux rails. La puissance nominale de ces unités est maintenant établie à 3 500 hp, mais rien ne laisse prévoir une répétition de la croissance phénoménale de rendement qu'avait rendu possible le turbo-compresseur actionné par les gaz d'échappement avec les unités de la deuxième génération. Une exception est peut-être la turbine à cycle de fond (voir la section 2.3) qui utilise l'énergie perdue en chaleur d'échappement pour accroître la puissance de l'entraînement.

La figure 2.2 montre les modifications de la puissance et du prix sur une période de temps.

Figure 2.2

AUGMENTATIONS DE LA PUISSANCE ET DU PRIX
DES LOCOMOTIVES DIESEL-ÉLECTRIQUES



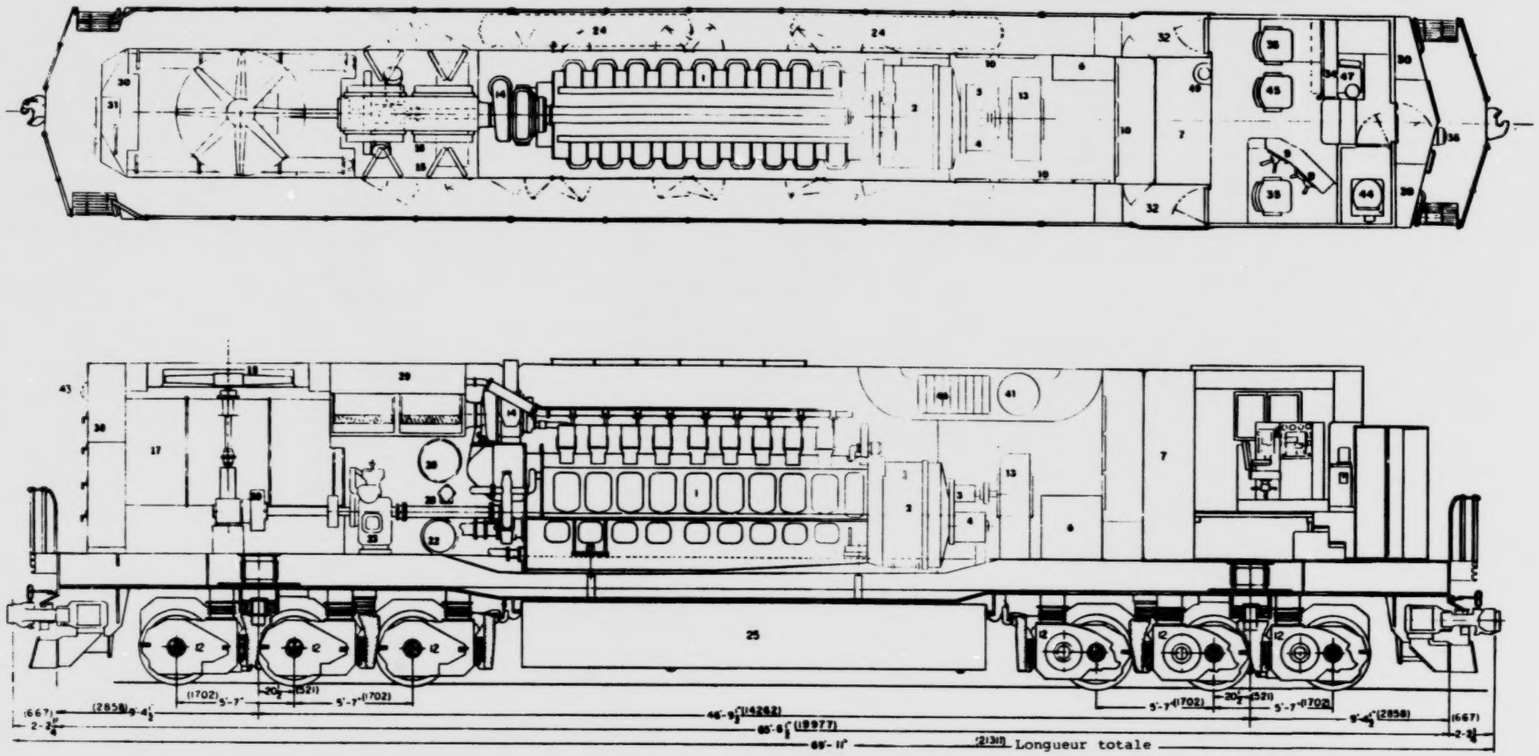
Sources: [7], [8], [9]

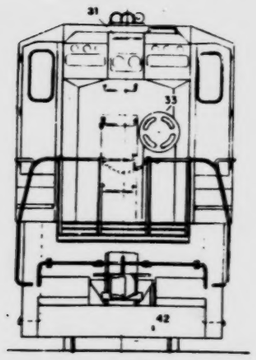
Pendant de nombreuses années, le coût de la locomotive diesel-électrique est resté à peu près de l'ordre de 100 $ par hp (les achats étant financés à des taux d'intérêt de 3 % ou moins). Au cours des huit dernières années, les prix ont augmenté de façon spectaculaire pour atteindre 330 $ par hp. Cette hausse considérable est attribuable principalement au coût élevé du capital et de la main-d'oeuvre. Les commandes récentes de nouvelles locomotives par les compagnies Sante Fe et Union Pacific se sont élevées à 340 nouvelles unités, à un coût moyen de 800 000 $ US chacune. Au Canada, les commandes courantes du Canadien Pacifique pour 160 nouvelles unités se chiffrent en moyenne à 950 000 $ CAN chacune [10].

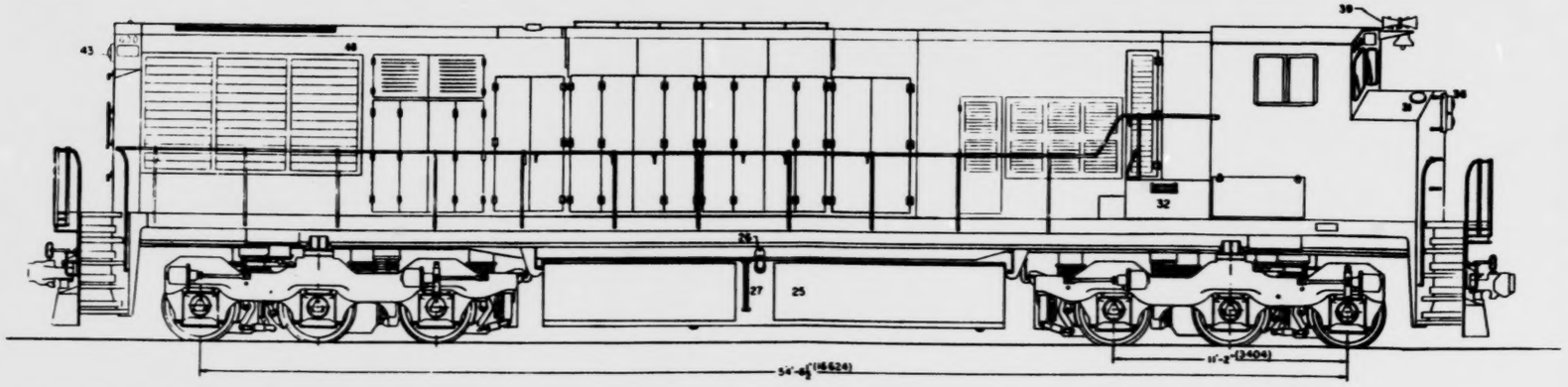
À la longue, la locomotive diesel-électrique s'est réduite à deux types principaux. La locomotive de type CoCo (deux bogies à trois essieux) qui est illustrée à la figure 2.3 est utilisée pour les trains importants ou sur les terrains fortement inclinés lorsque les exigences de l'adhérence excèdent la puissance en chevaux. Pour les vitesses plus rapides sur terrain plat, la locomotive de type Bo-Bo à quatre essieux qui est illustrée à la figure 2.4 continuera de dominer. Ces plans généraux montrent les principales composantes d'une locomotive de marchandises nord-américaine typique. Les principaux éléments de l'entraînement de la locomotive sont le moteur diesel, la génératrice principale ou l'alternateur, et les moteurs de traction.

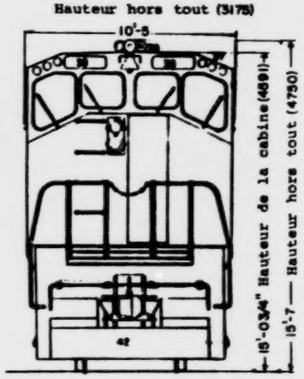
Au cours des dernières années, la plupart des commandes ont eu trait à des locomotives à six essieux, ce qui reflète une tendance vers les trains plus lourds et plus longs (voir la figure 2.5). Cette tendance devrait cependant céder la place à une utilisation accrue des locomotives à quatre essieux. On continuera d'utiliser les unités plus lourdes à six essieux, mais seulement dans les situations où elles sont absolument nécessaires. La différence de prix croissante entre une unité à six essieux et une unité à quatre essieux, ainsi que les coûts en carburant d'une charge supplémentaire de 50 à 60 tonnes par locomotive, favoriseront le développement d'un plus grand nombre d'applications pour les locomotives à quatre essieux [11].

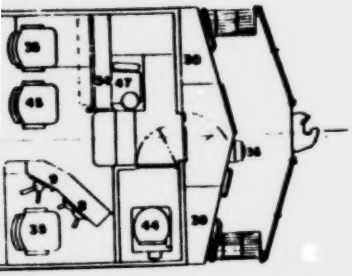
Le tableau 2.1 présente la gamme des locomotives diesel-électriques qui sont actuellement sur le marché nord-américain ou qui le seront bientôt. Ces nouvelles locomotives, dont les premières livraisons ont eu lieu en 1980 et 1981, sont représentatives des types de locomotives qui constitueront l'ensemble des parcs ferroviaires au cours des quinze prochaines années. General Motors, par exemple, a commencé à fabriquer les nouvelles unités GP-50 à quatre essieux en avril 1980, et le début de la production de la version SD-50 à six essieux est prévu pour 1981.

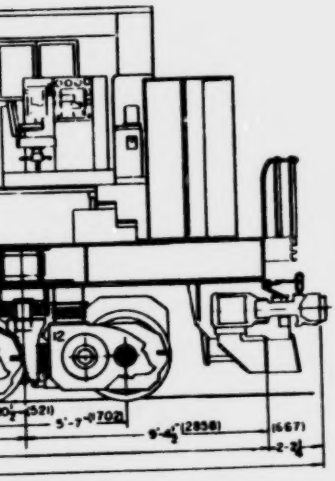

Longueur totale

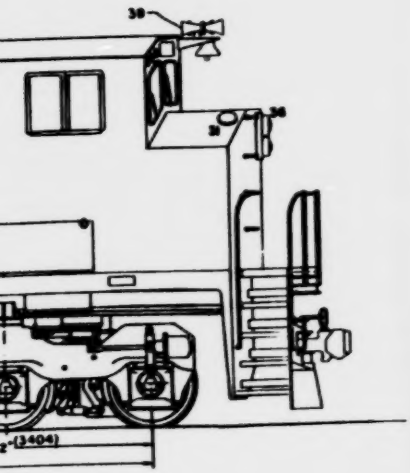





Hauteur hors tout (3175)
Hauteur de la cabine (4089)
Hauteur hors tout (4750)







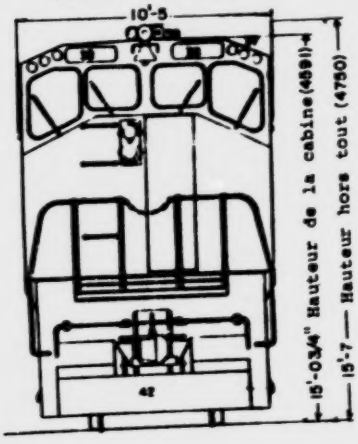


Figure 2.3

PLAN GÉNÉRAL D'UNE LOCOMOTIVE DE MARCHANDISES À SIX ESSIEUX

1- Moteur
2- Génératrice principale
3- Ventilateur de l'embrayage
4- Génératrice auxiliaire
5- Excitatrice
6- Redresseurs
7- Armoire d'appareillage
8- Pupitre de commande
9- Robinets de frein à air
10- Filtre de carosserie
11-
12- Moteur de traction
13- Ventilateur des moteurs de traction
14- Turbocompresseur
15- Filtres d'arrivée d'air du moteur - primaires
16- Filtres d'arrivée d'air du moteur - secondaires
17- Radiateur
18- Ventilateur de radiateur
19- Embrayage du ventilateur de radiateur
20- Filtre de lubrifiant
21-
22- Refroidisseur de lubrifiant
23- Compresseur d'air
24- Réservoir d'air principal
25- Réservoir à carburant
26- Raccord de remplissage du réservoir à carburant
27- Jauge de carburant
28- Filtre à carburant
29- Réservoir d'expansion de l'eau du moteur
30- Sablière
31- Sable
32- Accumulateurs
33- Frein à main
34- Chaufferette de cabine
35- Siège de cabine
36- Phare
37- Feux de triage
38- Voyant numérique
39- Avertisseur
40- Cloche
*41- Ventilateur de frein rhéostatique
42- Chasse-pierres
43- Phare de réserve
44- Toilette
45- Siège de cabine
*46- Résistances des freins rhéostatiques
*47- Fontaine d'eau glacée
48- Volet de radiateur
*49- Réchaud

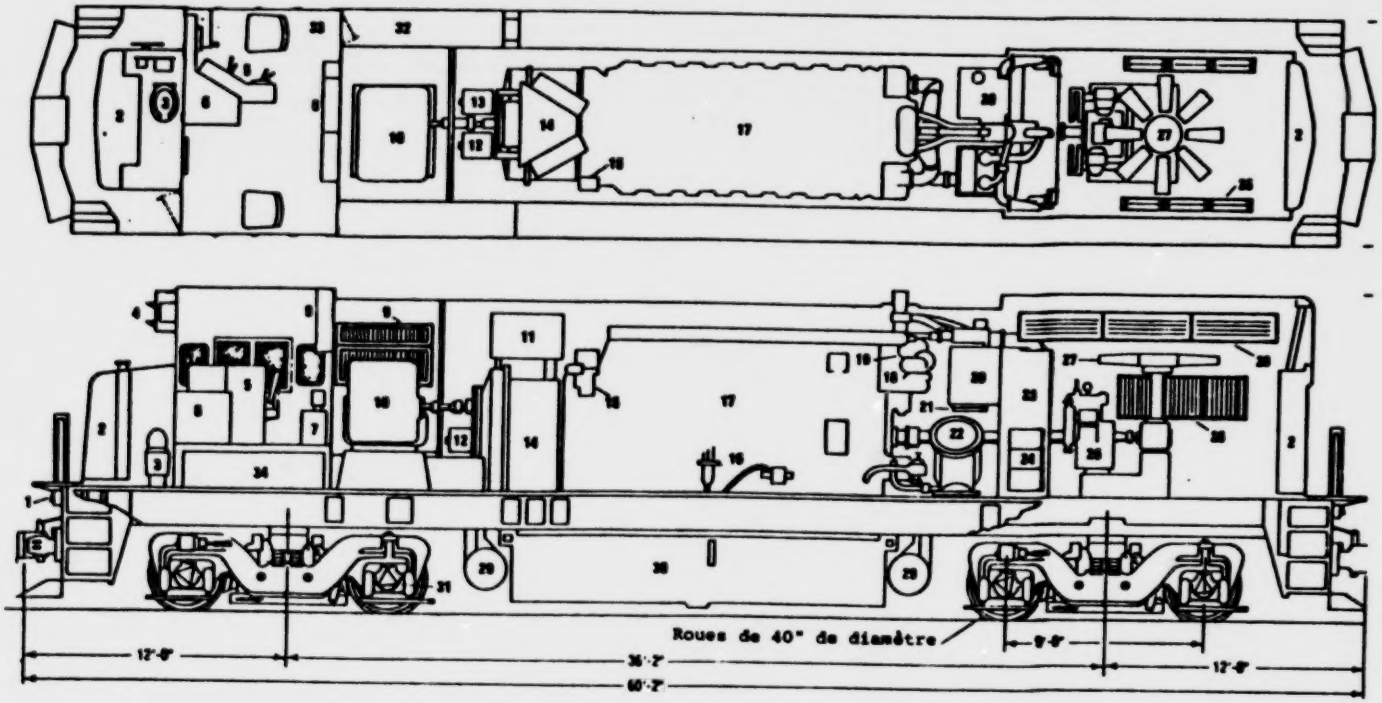
*Modifications

Bombardier Inc.
Montréal Canada
9828-090425

Source: [12]

Figure 2.4

PLAN GÉNÉRAL D'UNE LOCOMOTIVE
DE MARCHANDISES À QUATRE ESSIEUX



1- Connecteurs complexes
2- Sablière
3- Toilette (facultative)
4- Phare et voyants numériques
5- Poste de commande
6- Chaufferette de cabine
7- Fontaine d'eau glacée (facultative)
8- Dispositif de commande du moteur
9- Arrivée d'air de l'équipement
10- Ventilateur de l'équipement
11- Redresseur
12- Génératrice auxiliaire
13- Excitatrice
14- Génératrice de traction
15- Régulateur
16- Pompe et filtre à carburant
17- Moteur diesel
18- Refroidisseur intermédiaire
19- Turbocompresseur
20- Réservoir de refroidissement de l'eau
21- Refroidisseur de lubrifiant
22- Filtre de lubrifiant
23- Filtres à air de chambre d'huile
24- Épurateurs d'air primaires du moteur
25- Compresseur d'air
26- Grilles de frein dynamique
27- Ventilateur de radiateur
28- Radiateur
29- Réservoir d'air
30- Réservoir à carburant
31- Alternatrice d'essieu (une par essieu)
32- Accumulateur (côté droit)
33- Équipement des freins à air (côté droit)
34- Armoire d'appareillage (côté gauche)

La locomotive typique d'aujourd'hui est une locomotive de ligne à capots. Voici un modèle GE U36B—3 600 hp, quatre essieux, toute puissance.

Tableau 2.1

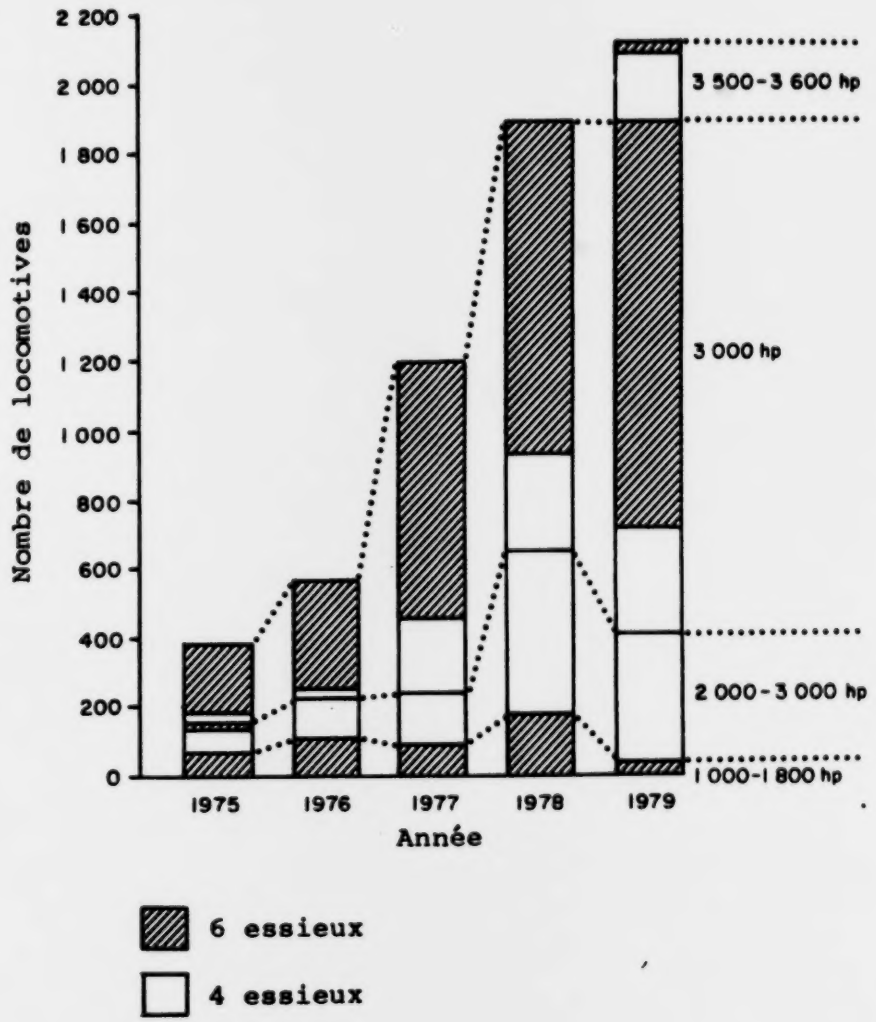
LOCOMOTIVES DE MARCHANDISES ACTUELLEMENT EN USAGE EN AMÉRIQUE DU NORD

Modèles de la locomotive				Moteur					Poids de la locomotive (service, lb)				
Bombardier Inc.	Électro-motrice	General Electric	Arrangement des roues	hp pour traction	Cylindres	Tours/min. pleine charge	Modèle	Turbo-compresseur	Minimum	Maximum	Caractéristiques de base	Exemples d'options offertes	Remarques
	GP-15-1		B-B	1 500	12	900	645E	Non	240 000	–		Ralenti	Disponible sur échange seulement
		B-18-17	B-B	1 800	8	1 050	FDL	Oui	230 600	268 000	Embrayage 83:20	Ralenti	
	GP-38-2		B-B	2 000	16	900	645E	Non	250 000	277 500		Ralenti	SD-39 à 6 essieux comme équivalent disponible
		B-23-7	B-B	2 250	12	1 050	FDL	Oui	253 000	280 000		Ralenti	C-23 à 6 essieux comme équivalent disponible
	GP-39-2		B-B	2 300	12	900	645 E3B	Oui	250 000	277 500		Ralenti	
HR412			B-B	2 400	12	1 000	251E	Oui	240 000	272 000	Patinage microlimite	Carosserie pleine largeur, alimentation par la tête de 500 kW	Premières livraisons en 1981
	GP-39X		B-B	2 700	12	950	645F3	Oui	n.d.	n.d.	Roues "Super-Series", contrôle du glissement, embrayage 70:17		Prototypes GP-49 livrés fin 1980
		B-28-7	B-B	2 750	12	1 050	FDL	Oui	253 000	280 000	Embrayage 83:20	Ralenti	
		C-28-7	C-C	2 750	12	1 050	FDL	Oui	359 000	420 000	Embrayage 83:20	Ralenti	
	GP-40-2		B-B	3 000	16	900	645 E3B	Oui	256 000	277 500		Ralenti	
		B-30-7	C-C	3 000	16	1 050	FDL	Oui	259 000	280 000	Embrayage 83:20	Moteurs 752 AF, ralenti	
	SD-40-2		C-C	3 000	16	900	645 E3B	Oui	368 000	420 000		Ralenti	

Modèles de la locomotive				Moteur					Poids de la locomotive (service, lb)				
Bombardier Inc.	Électro-motrice	General Electric	Arrangement des roues	hp pour traction	Cylindres	Tours/min. pleine charge	Modèle	Turbo-compresseur	Minimum	Maximum	Caractéristiques de base	Exemples d'options offertes	Remarques
		C-30-7	C-C	3 000	16	1 050	FDL	Oui	366 000	420 000	Embrayage 83:20	Moteurs 752 AF, ralenti	
HR416			B-B	3 200	16	1 000	251E	Oui	255 000	280 000	Détection du patinage microlimite	Carosserie pleine largeur, alimentation par la tête de 500 kW	Premières livraisons en 1981
HR616			C-C	3 200	16	1 000	251E	Oui	380 000	420 000	Détection du patinage microlimite	Carosserie pleine largeur	Premières livraisons en 1982
	GP-50		B-B	3 500	16	950	645F3	Oui	260 000	277 500	Routes "Super-Series", contrôle du glissement embrayage 70:17		Livraison des premières unités de production en avril 1980
	SD-50		C-C	3 500	16	950	645F3	Oui	368 000	n.d.	Roues "Super-Series", contrôle du glissement embrayage 70:17		Premières livraisons en 1981
		B-36-7	B-B	3 600	16	1 050	FDL	Oui	260 000	280 000	Contrôle de l'adhérence "Sentry", embrayage 83:20	Ralenti	Premières livraisons en octobre 1980
		C-36-7	C-C	3 600	16	1 050	FDL	Oui	366 000	420 000	Contrôle de l'adhérence "Sentry", embrayage 83:20	Ralenti	
HR618			C-C	3 600	18	1 000	251E	Oui	388 000	420 000	Détection du patinage microlimite	Carosserie pleine largeur	Premières livraisons en 1982

Figure 2.5

LOCOMOTIVES COMMANDÉES POUR
L'AMÉRIQUE DU NORD, 1975-1979



Source: [11]

La conception des plus récentes locomotives de la troisième génération qui sont produites par les trois fabricants offre des caractéristiques communes:

a) accent placé sur les améliorations en économie de carburant, entraînant ainsi une amélioration de 7 % par rapport aux modèles précédents;

b) conception modulaire des composantes électriques et des autres pièces des locomotives, afin de permettre leur remplacement rapide;

c) systèmes modernes de contrôle du patinage, accroissant de 33 % la capacité d'une locomotive de monter des pentes prononcées; et

d) introduction de microprocesseurs pour faciliter le contrôle et le fonctionnement des machines locomotives.

Au Canada, Bombardier Inc. a été chargée par le ministère de l'Industrie et du Commerce de mettre au point un prototype de ce qui pourrait être la première véritable nouvelle génération de locomotives. La conception du prototype sera complètement revue et intégrera toutes les dernières techniques locomotives plutôt que de modifier les conceptions actuelles. La nouvelle locomotive pourra comprendre certaines techniques comme les moteurs de traction à courant alternatif (voir la section 2.8), les bogies à essieux directeurs (voir la section 5.5) et les microprocesseurs pour le contrôle et le fonctionnement.

2.3 Moteurs primaires

Le moteur primaire est la source d'énergie utilisée pour entraîner la locomotive. Dans le cas de la locomotive diesel-électrique, le moteur primaire se trouve à bord sous la forme du moteur diesel. La locomotive électrique, par contre, ne comporte pas de moteur primaire à bord. L'énergie provient d'une source externe par l'intermédiaire d'un système suspendu de caténaires. La locomotive ne fait alors fonction que de conditionneur de l'énergie qui réglemente la puissance fournie aux moteurs de traction. Elle n'assure pas sa propre alimentation.

La présente partie porte sur les récents progrès qui ont été accomplis pour la mise au point de moteurs primaires à bord des locomotives. Le moteur diesel continuera de remplir ce rôle au cours des dix prochaines années, bien que les types de carburants utilisés pourront varier. Les recherches se poursuivent pour trouver d'autres moteurs possibles, mais on n'a pas encore été capable de mettre au point un moteur qui puisse faire concurrence au diesel sur le plan du coût initial, de

l'économie de carburant et de la fiabilité. Cette situation pourrait changer par suite de la disponibilité et du coût relatif des différents carburants ou de décisions gouvernementales en faveur de l'électrification.

La première génération de diesels utilisait des moteurs à aspiration naturelle d'une puissance nominale de 1 500 hp. Ces moteurs ont commencé à être remplacés par des locomotives diesel de deuxième génération quelque quinze ans plus tard, à mesure que celles de la première génération étaient prêtes pour leur troisième révision importante. Les locomotives de la deuxième génération étaient des unités de 3 000 hp intégrant le turbocompresseur entraîné par les gaz d'échappement. Le turbocompresseur utilise tout simplement l'impulsion donnée par les gaz d'échappement du moteur pour entraîner une pompe à air qui, à son tour, pousse l'air dans le moteur avec une pression pouvant aller jusqu'à 16 lb par po^2 [13]. Ce système accroît le rendement thermique et la puissance du moteur.

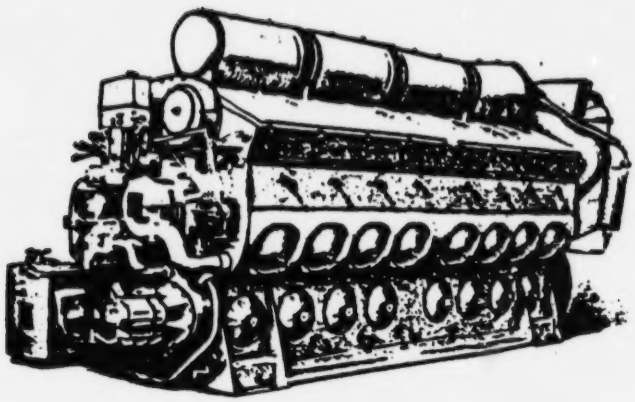
À mesure que les unités de la deuxième génération atteignent la fin de leur durée économique, elles sont remplacées par les locomotives de la troisième génération. Les locomotives diesel de la troisième génération représentent en fait une version améliorée des diesels à turbocompresseur de la deuxième génération. La puissance disponible pour la traction a été accrue sur certains modèles, mais l'accent a été placé sur l'économie de carburant (voir la section 2.4).

Au cours des quelques dernières années, les progrès techniques ont cessé de concerner uniquement l'augmentation de la puissance pour viser à mettre au point un produit conservateur et plus fiable, qui est d'un entretien moins dispendieux au niveau de son coût de cycle de vie [9],[11].

Le moteur diesel de pointe de General Motors, le modèle 645F qui est illustré à la figure 2.6, peut fournir 500 hp de plus que son prédécesseur tout en réduisant la consommation de carburant de 3,5 % (environ 11 000 gallons par année). Les améliorations apportées au moteur, qui sont abordées plus en détail à la section 2.4, sont notamment les suivantes: amélioration de l'injection du carburant, système d'appui pour le moteur, fonctionnement par turbocompresseur, diminution des réglages de l'étrangleur pour le freinage rhéostatique et au ralenti, et un système de contrôle du moteur qui permet au conducteur d'arrêter le moteur lorsqu'il n'est pas utilisé.

Figure 2.6

DIESEL EMD, MODÈLE 645F



Diesel 645F de EMD, 16 cylindres à deux temps et à turbocompression, utilisé pour les nouvelles locomotives de la série 50. Il peut fournir 3 800 hp, dont 3 500 sont disponibles pour l'effort de traction.

Bombardier Inc., qui fabrique des locomotives depuis 1904, a produit sa première locomotive diesel en 1948. Depuis ce temps, la compagnie a fabriqué plus de 2 500 unités, dont 30 % ont été expédiées à des clients d'outre-mer. Ses moteurs actuels comprennent des modèles de 6, 8, 12, 16 et 18 cylindres, qui peuvent fournir de 875 à 4 500 hp. Ces moteurs sont fabriqués en vertu d'un permis obtenu de l'American Locomotive Company (ALCO). Ces nouvelles locomotives devraient être prêtes en 1982. Elles comportent des ventilateurs de refroidissement, ainsi que certaines améliorations apportées aux moteurs et aux turbocompresseurs qui entraînent une diminution de 7,1 % de la consommation de carburant tout en conservant la même puissance. La maintenance et la fiabilité des moteurs seront accrues grâce à la présence à bord d'un équipement de diagnostic à microprocesseurs qui permettra de repérer les défectuosités ou les mauvais fonctionnements [14].

General Electric prévoit également d'autres mesures d'économie du carburant pour 1981 avec une nouvelle version de son moteur quatre temps à 16 cylindres. Elle annonce des économies de carburant de 7 % grâce à des modifications semblables à celles qui ont été apportées par General Motors [15].

Même s'il semble avoir atteint sa performance maximale, le moteur diesel devrait demeurer la principale forme de moteur primaire pour les locomotives au cours des huit à dix prochaines années. Il est difficile d'améliorer le rendement thermique d'un diesel moderne, qui s'élève actuellement à environ 30 %, sans accroître en même temps la charge thermique. Pour accroître la puissance, il faudrait sacrifier l'efficacité du moteur pour des coûts de maintenance plus élevés et une fiabilité moindre. Toute augmentation future de puissance devra donc être accompagnée d'une fiabilité plus grande. Ou, à tout le moins, la fiabilité ne devrait pas en souffrir, car tous les avantages économiques obtenus par les économies seront rapidement annulés par le retrait de la locomotive pour effectuer des réparations. Tout en gardant la fiabilité au même niveau, les améliorations de la performance doivent actuellement se faire sans accroître les émissions de gaz [16].

On a envisagé ou mis au point d'autres solutions pour des moteurs primaires de locomotives: par exemple, les turbines à gaz, les machines à vapeur, les moteurs Stirling, les moteurs à cylindrée variable et même les moteurs nucléaires. Cependant, aucun ne semble être en mesure de faire concurrence au diesel. La durée moyenne d'une locomotive diesel-électrique est de quinze à vingt ans, après quoi la locomotive peut être vendue ou réusinée d'après les normes diesel courantes. En raison de la longue durée et de la fiabilité prouvée du matériel actuel, l'accès sur le marché de nouvelles techniques qui n'ont pas fait leurs preuves se révèle difficile. Néanmoins, depuis dix ans, les sociétés ferroviaires se sont montrées de plus en plus disposées à accepter les nouvelles techniques pourvu qu'elles aient les capitaux nécessaires pour les mettre en oeuvre. L'orientation future de la conception des locomotives de marchandises sera influencée par certaines expériences passées qui ont amené l'élaboration d'un produit évolutif.

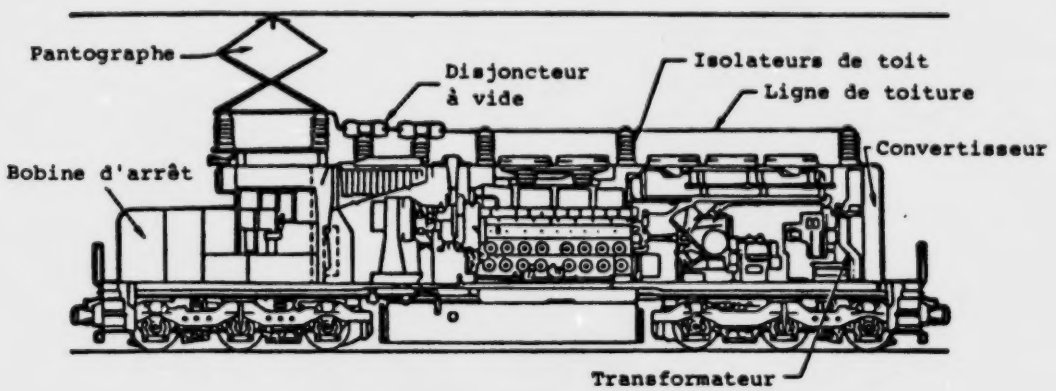
Dans le passé, le plus sérieux rival du diesel a été la turbine à gaz à cycle de récupération [6]. De 1947 à 1949, Union Pacific Railroad avait 55 locomotives électriques à turbine à gaz en service [17]. Ces locomotives, dont la puissance nominale pouvait s'élever jusqu'à 8 500 hp, avaient été construites conjointement par les compagnies General Electric et ALCO. Même si elles représentaient à l'époque une réussite sur le plan technique et ont été très utiles pour le traînage des marchandises lourdes, elles ont été graduellement retirées de la circulation. Les moteurs étaient des turbines à ailettes fixes qui avaient un domaine de fonctionnement efficace très étroit. À vitesse réduite ou au ralenti, un moteur diesel auxiliaire était nécessaire pour faire fonctionner la locomotive de manière à éviter une consommation élevée de carburant et à prévenir les accumulations de cendres dans les turbines. L'utilisation d'autres carburants comme le propane ou la poussière de charbon a également été expérimentée mais, de façon générale, n'a pas été jugée faisable, car il fallait de nouvelles installations de service pour le deuxième type de carburant.

À l'heure actuelle, la turbine est encore inférieure au diesel comme moteur primaire sur le plan de l'économie de carburant et du coût initial, deux facteurs importants pour une locomotive de chemin de fer. D'autre part, les avantages de la turbine pour ce qui est de son poids réduit et de sa compacité ne sont pas très significatifs pour des applications ferroviaires. Cependant, la capacité de la turbine de brûler différents carburants pourrait à l'avenir devenir un facteur important si les approvisionnements de carburant diesel se faisaient rares.

Depuis un certain temps, on s'intéresse à la mise au point d'une locomotive bimodale comme solution de rechange à l'électrification complète des lignes principales. La figure 2.7 montre le plan d'une locomotive de ce type.

Figure 2.7

LOCOMOTIVE BIMODALE



Projet de locomotive bimodale. Tirant sa puissance d'un caténaire à haute tension en montant une pente prononcée (et redonnant sa puissance en descendant), elle pourrait fournir environ 50 % de horsepower de plus que lorsqu'elle fonctionne comme une diesel électrique.

Source: [11]

La Federal Railroad Administration (FRA) des États-Unis et le département de l'Énergie ont proposé aux sociétés ferroviaires un programme de six ans pour la construction et l'évaluation d'une locomotive bimodale. La FRA estime que le nouveau système pourrait permettre de recouvrer les coûts du capital en trois ans comparativement à un délai de six à dix ans pour l'électrification conventionnelle, en électrifiant uniquement les sections de la ligne qui comportent les besoins les plus élevés en énergie.

Si l'électrification des lignes principales se fait, la locomotive bimodale pourrait également fonctionner sur des lignes secondaires et des voies d'évitement non électrifiées qui sont peu achalandées.

À l'avenir, l'électrification des parties de chemins de fer où il existe des pentes prononcées permettra aux trains lourds de récupérer, grâce au freinage rétroactif, une partie de l'énergie qui est maintenant gaspillée par le freinage rhéostatique et mécanique. Dans ce mode de fonctionnement, les moteurs de traction deviennent comme des génératrices qui renvoient la puissance au caténaire suspendu lorsqu'ils freinent le train sur une pente descendante. On peut ainsi récupérer une bonne partie de la puissance.

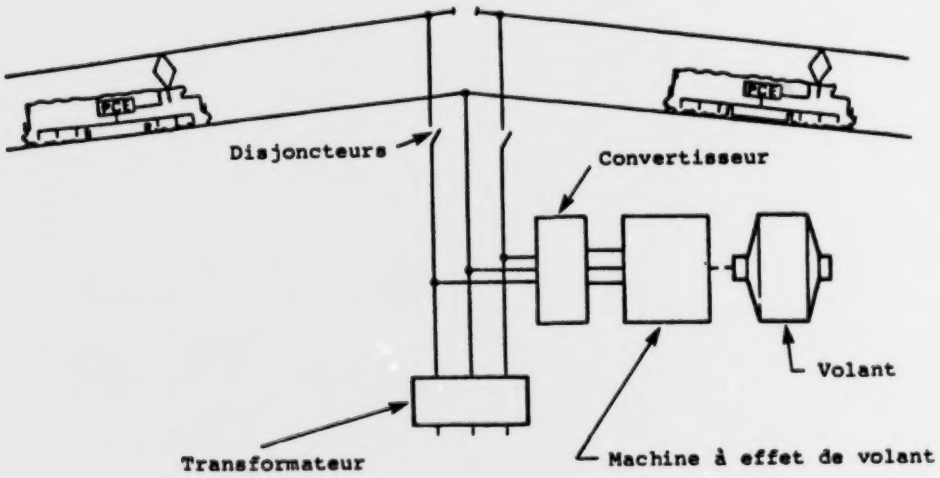
Par exemple, dans l'heure qu'il faut à un important train de marchandises pour descendre le col Cajon près de San Bernardino en Californie, il est possible de produire suffisamment d'énergie électrique pour alimenter une collectivité résidentielle de 30 000 personnes. D'après les coûts énergétiques de 1977, cela représente une économie de 500 $ en carburant diesel pour une heure.

On a également effectué des études pour examiner la faisabilité des systèmes de stockage de l'énergie le long des voies, ou systèmes WESS [18],[19], tels qu'illustrés à la figure 2.8. Au moyen de cette technologie, il est possible, grâce au freinage par récupération, de stocker l'énergie que produit un train sur une pente descendante dans un volant de 604 tonnes situé dans une fosse le long de la voie. L'énergie stockée est alors utilisée par le prochain train qui monte la pente.

On a également étudié la possibilité d'utiliser un système de stockage par volant à bord des locomotives de manoeuvre [21]. Des données ont été recueillies à partir des périodes de service réelles des locomotives de manoeuvre et elles ont été utilisées dans un modèle informatique pour simuler les activités avec et sans le volant. L'étude a démontré que le système ne permettait aucune économie de carburant à cause du poids supplémentaire du wagon couvert distinct qu'il fallait pour loger le système de volant. Les systèmes de stockage par volant à bord de locomotives importantes de ligne principale ne sont pas encore pratiques en raison des dimensions considérables du système qui est requis.

Figure 2.8

SYSTÈME DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE
LE LONG DES VOIES (WESS)



Le système WESS est compatible avec l'électrification normale des lignes principales, réduit les besoins en matériel, minimise les effets de lourdes charges intermittentes sur les services publics et permet la récupération de la puissance sur la pente descendante.

On effectue actuellement des recherches pour démontrer la faisabilité d'un autre moteur primaire tiré de la technologie de l'époque de la vapeur.

Une version moderne de la machine à vapeur alternative au charbon est proposée par American Coal Enterprises [22], qui a reçu l'appui de certains organismes privés pour le projet. On estime que la construction des deux premiers prototypes coûtera 25 000 000 $; les modèles de production pourraient être fabriqués à un coût d'environ 25 % supérieur à celui des diesels actuels. D'après les coûts actuels du carburant, la locomotive au charbon devrait réduire les coûts du carburant de 33 % par rapport au diesel. La locomotive au charbon a un rendement thermique de 15 %. Ce rendement est trois fois supérieur à celui des anciennes locomotives à vapeur, mais n'est encore que la moitié de celui des locomotives diesel d'aujourd'hui.

La locomotive à vapeur qui est proposée aurait quatre essieux moteurs de 60 000 livres, actionnés par quatre cylindres à vapeur et supportant de grosses roues de 54 pouces de diamètre. Elle est conçue pour parcourir des distances de 500 milles entre les arrêts de ravitaillement en carburant et de 1 000 milles entre les arrêts de ravitaillement en eau. La grille mécanique, la direction de l'air, l'alimentation de la chaudière et les autres fonctions locomotives font toutes appel à des contrôles modernes par microprocesseur.

Il n'existe aucune estimation des coûts de l'approvisionnement en carburant et en eau le long des voies.

Des organismes privés, parrainés par la FRA des États-Unis, étudient actuellement d'autres systèmes perfectionnés de propulsion qui pourraient être utilisés comme moteurs primaires de chemins de fer. Les études portent notamment sur des techniques comme les cycles de fond, la turbocompression, les diesels adiapatiques, les moteurs à cycle de Sterling et de Rankine et les moteurs de Brayton. Les résultats de ces expériences seront disponibles à la fin de 1981 [20].

Les moteurs qui utilisent d'autres formes de carburant comme l'alcool, l'hydrogène ou le carburant diesel hors spécifications sont traités plus en détail au chapitre 3.

2.4 Rendement énergétique

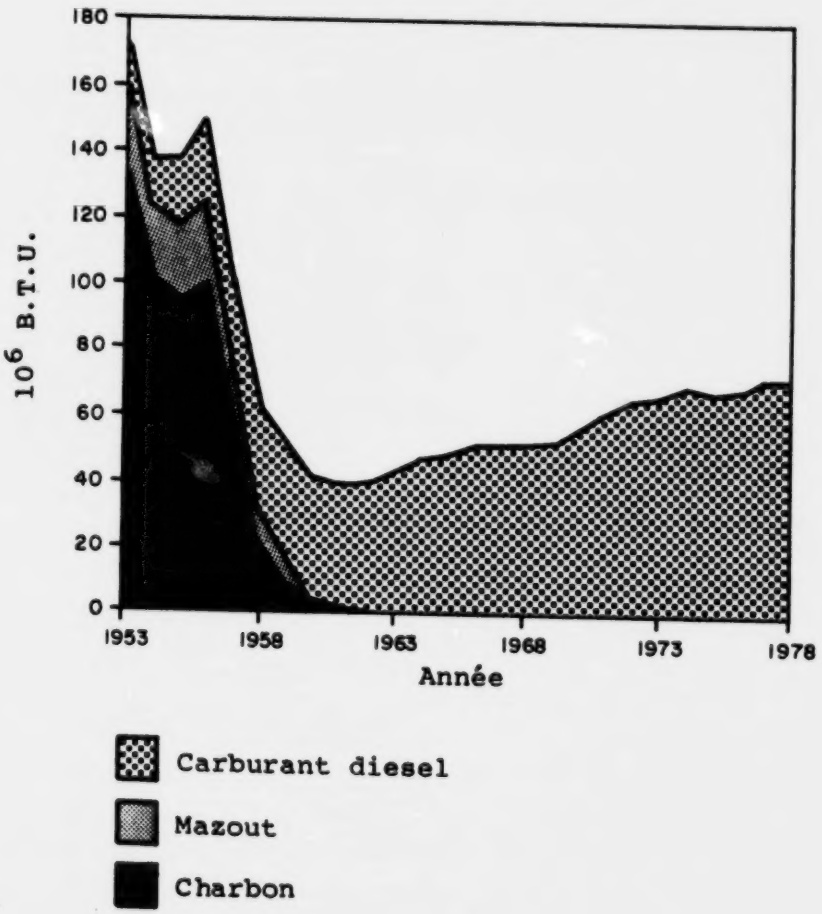
Les meilleures locomotives au charbon de l'époque de la vapeur obtenaient un rendement thermique de 4 % à 5 % en transformant l'énergie thermique du charbon en une énergie mécanique utilisable. Avec le passage aux moteurs diesel et à un rendement de 30 %, la consommation d'énergie diminua sensiblement. L'énergie utilisée aujourd'hui par les locomotives est encore moins de la moitié de celle consommée par les locomotives à vapeur en 1953. La figure 2.9 illustre ce point.

Étant donné l'abondance du carburant diesel, la conception du moteur diesel de 1948 à 1973 visa à accroître la puissance. Au cours de cette période, peu d'améliorations ont été apportées sur le plan du rendement énergétique. La hausse du coût du carburant depuis 1973 a eu pour effet de faire mettre l'accent sur l'amélioration de l'économie de carburant plutôt que sur l'accroissement de la puissance.

Les diesels modernes à turbocompression ont amélioré la consommation de carburant, la réduisant à 0,365 livres par hp/h, comparativement à 0,390 livre par hp/h pour les anciens moteurs à aspiration naturelle [13]. La consommation de carburant pour les locomotives de ligne principale est actuellement d'environ 1,33 gallon impérial par mille.

Figure 2.9

ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LE SERVICE DE TRANSPORT
DE MARCHANDISES À FORCE MOTRICE
AU CANADA, 1953-1978



Source: [2]

Les coûts du carburant ont augmenté considérablement malgré l'accroissement du rendement. En 1968, les coûts annuels moyens pour le carburant s'élevaient à 17 000 $ par unité, comparativement à 65 000 $ par unité en 1978 [2]. À l'heure actuelle, quelque 4 000 locomotives diesel-électriques consomment chaque année 500 millions de gallons de carburant, soit 17 % de la consommation de carburant diesel au Canada.

Le tableau 2.2 montre les taux de consommation de carburant et le temps en pourcentage aux différents réglages de l'étrangleur pour une locomotive à marchandises typique de la deuxième génération. Le ralenti occupe une partie importante du temps de fonctionnement. C'est la règle de garder le moteur constamment en marche entre les révisions. Les contrôles de la purge du moteur, qui seront décrits plus loin, permettront d'arrêter les nouveaux moteurs lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Aux fins de l'évaluation de la consommation de carburant, le temps de fonctionnement annuel est à peu près de 6 700 heures pour une locomotive de ligne principale. Étant donné que la pleine accélération et l'allure de ralenti représentent jusqu'à 71 % du temps de fonctionnement, les améliorations qui seront apportées dans ces secteurs auront une influence significative sur la consommation générale de carburant.

Il est difficile d'améliorer le rendement du cycle du diesel lui-même, mais de nombreux changements sont apportés à l'équipement auxiliaire de locomotive et à son fonctionnement en vue de réduire la consommation de carburant.

Pour son nouveau moteur de modèle 645F, General Motors a porté de 3 000 à 3 500 hp la puissance disponible pour la traction tout en réduisant la consommation de carburant de 3,5 %, soit environ 11 000 gallons par année.

Voici quelques-unes des modifications qui ont été apportées à ce moteur de la troisième génération, sur le plan de l'économie de carburant [25],[95]:

a) perfectionnement du système d'injection de carburant, entraînant une amélioration de 2 % de la consommation de carburant à la puissance nominale maximale;

b) nouveau roulement à billes pour les tourillons de la tête de piston en vue d'améliorer la lubrification et de compenser la charge accrue du moteur;

c) à faible régime, le turbocompresseur est mécaniquement assisté, ce qui donne une amélioration de 1,5 % de l'économie de carburant par rapport aux cycles normaux d'utilisation;

Tableau 2.2

CYCLES NORMAUX DE CONSOMMATION DE CARBURANT ET D'UTILISATION POUR UNE LOCOMOTIVE DIESEL-ÉLECTRIQUE UNIVERSELLE À QUATRE ESSIEUX

Position de l'étrangleur	Consommation de carburant locomotive GP-40 (gal. imp./h)	Puissance nominale en %	Cycle d'utilisation		
			Lourd	Moyen	Léger
8	140	100	30	17	9
7	121	86	3	4	3
6	90	66	3	4	3
5	66	51	3	4	3
4	48	35	3	4	3
3	34	23	3	4	3
2	21	12	3	4	3
1	6	5	3	4	3
Ralenti	5	0,75*	41	46	66
Frein rhéostatique	17	3	8	9	5

*Puissance auxiliaire de la locomotive

Sources: [23], [24]

d) ventilateurs de radiateur à contrôle thermostatique qui ne fonctionnent que lorsqu'il le faut;

e) réglage moins élevé de l'étrangleur pour le freinage rhéostatique du moteur, entraînant une autre économie de carburant de 1 % pour ce mode de fonctionnement;

f) meilleur rendement thermique du moteur par suite de l'amélioration du système d'injection;

g) réduction de 315 à 225 t/min de l'allure de ralenti, ce qui donne une économie de carburant de 7 % par rapport aux cycles normaux d'utilisation; et

h) contrôle automatique de la purge du moteur, qui permet d'arrêter les moteurs lorsqu'ils ne sont pas utilisés et de les faire redémarrer sans risquer d'endommager le moteur par suite de la présence de réfrigérant dans les cylindres. Dans le passé, la règle a toujours été de laisser les moteurs constamment en marche entre les révisions. Grâce au contrôle de la purge, un moteur peut être arrêté lorsque la température ambiante est supérieure à 10° C. Les économies de carburant sont importantes si l'on considère que dans les cycles normaux d'utilisation, un moteur tourne au ralenti pendant 40 % du temps. Comme aucun antigel n'a encore été mis au point pour les locomotives, les moteurs ne sont jamais arrêtés lorsque la température descend au-dessous du point de congélation [13]. Si les solutions conventionnelles à base de glycol s'infiltraient dans l'huile du moteur, il s'ensuivrait une dégradation rapide du moteur, risque que les conducteurs ne sont pas prêts à courir.

Bombardier Inc. revendique des améliorations de 7,1 % sur le plan de l'économie de carburant, soit environ 23 000 gallons par année par rapport aux modèles précédents, tout en conservant la même puissance nominale [14]. Ces améliorations comprennent notamment les suivantes:

a) conception nouvelle des composantes du moteur et du turbocompresseur,

b) ventilateurs de refroidissement à contrôle thermostatique, et

c) réduction de 1 100 à 1 000 t/min de la vitesse du moteur à la pleine accélération.

D'après General Electric, les améliorations qu'elle a apportées à ses nouvelles locomotives sur le plan de l'économie de carburant réduisent de 7,2 % la consommation de carburant,

soit à peu près 23 000 gallons par année. Ces améliorations comprennent notamment les suivantes:

a) améliorations du turbocompresseur,

b) réduction de la puissance en horse-power des ventilateurs de refroidissement grâce au contrôle thermostatique,

c) réduction de la vitesse du moteur au ralenti, et

d) meilleure correspondance entre la vitesse du moteur et les exigences relatives à la charge et au freinage rhéostatique.

D'autres économies de carburant peuvent être réalisées en utilisant des dispositifs additionnels qui ne sont pas encore largement utilisés et en modifiant les méthodes de fonctionnement des locomotives.

La réduction de la vitesse du train permettra de diminuer la consommation de carburant étant donné que la résistance aérodynamique et la résistance du roulement, et par conséquent les besoins en horse-power, sont fonction de la vitesse. Pour diminuer la vitesse du train, on doit réduire le nombre de bloc-moteurs ou accroître le tonnage du train. Il ne faut pas abaisser la position de l'étrangleur du moteur car, étant donné les caractéristiques particulières des diesels à turbocompression sur le plan de la consommation de carburant, la consommation, mesurée en gallons par horse-power de chemins de fer, s'accroît à mesure qu'on abaisse la position de l'étrangleur [11].

Si on parvient à maintenir la vitesse du train en gardant à pleins gaz certaines des unités d'un train qui a plus d'une locomotive tout en laissant les autres moteurs au ralenti, alors il est possible de réaliser des économies de carburant. L'économiseur de carburant qui a été mis à l'essai par la FRA des États-Unis permet aux mécaniciens qui se trouvent dans l'unité de tête de contrôler les autres unités de façon individuelle. D'après plusieurs sociétés ferroviaires, l'unité de contrôle, qui coûte 1 100 $ US, peut permettre de réduire jusqu'à 10 % la consommation de carburant selon le terrain [26]. Les recherches effectuées par CP Rail concluent que le fonctionnement à pleins gaz présente tout au plus un avantage de 5 % sur le plan du rendement par rapport aux positions intermédiaires de l'étrangleur, et que la consommation de carburant des moteurs au ralenti se situe entre 4 % et 7 % de celle du fonctionnement à pleins gaz. Ils concluent donc que l'économie maximale de carburant à laquelle on peut s'attendre est de 1 % [27]. Le Canadien Pacifique estime que les économies mentionnées par d'autres usagers résultent d'une diminution de la vitesse, ce qui réduit les besoins en horse-power.

À mesure que le prix du carburant grimpera, les efforts en vue de réduire la consommation de carburant des locomotives se poursuivront. Les améliorations qui seront apportées dans un proche avenir prendront les formes suivantes: dispositifs de modifications sur les locomotives de production actuelles; meilleur contrôle de l'adhérence des roues aux rails; contrôle plus serré des activités des chemins de fer; réduction de la vitesse des trains; correspondance plus étroite entre la puissance et la charge, en particulier grâce à l'utilisation de microprocesseurs en temps réel; formation du personnel des chemins de fer concernant les pratiques en matière d'économie de carburant; et amélioration de l'entretien des locomotives.

On est en train de mettre au point des modèles informatiques des performances des trains pour considérer la consommation de carburant et la résistance des trains (roulement et aérodynamique) comme une fonction des wagons individuels plutôt que pour l'ensemble du train [28]. Les enquêtes montrent que les économies de carburant permises par diverses techniques dépendent largement du type d'exploitation (vitesse, affectation des locomotives, manoeuvre des trains, entretien).

Une utilisation accrue des locomotives à quatre essieux à forte adhérence dans l'avenir est également probable. Une locomotive à quatre essieux utilise à peu près 80 000 gallons de moins de carburant par année, là où elle peut efficacement remplacer les unités à six essieux [32].

Voici des secteurs où des améliorations à long terme pourront être apportées au niveau du rendement énergétique: systèmes de stockage de la puissance pour le freinage par récupération sur les pentes descendantes; diminution de la résistance aérodynamique et de la résistance de roulement; et amélioration du rendement thermique global du moteur diesel.

Une façon d'améliorer le rendement thermique consisterait à récupérer l'énergie thermique des moteurs et des gaz d'échappement à l'aide d'un moteur à cycle de Rankine pour accroître la puissance motrice du train. Les compagnies Thermo-Electron Corporation à Waltham (Massachusetts) et General Motors effectuent actuellement des recherches sur ce processus. Un échangeur de chaleur des gaz d'échappement est utilisé pour chauffer un gaz moteur qui à son tour entraîne une petite turbine à cycle de Rankine, ajoutant 50 hp au moteur diesel d'essai de 288 hp dans les laboratoires de Thermo-Electron [29]. Si on pouvait appliquer à une locomotive la même augmentation relative, la puissance du moteur passerait de 3 500 hp à 4 100 hp, sans augmenter la consommation de carburant. La Division électromotrice de General Motors effectue des recherches sur cette application depuis plusieurs années mais, autant que l'on sache, n'a pas encore dépassé le stade du laboratoire.

Le tableau 2.3 montre les possibilités de récupérer l'énergie thermique grâce à des applications comme le moteur à cycle de Rankine. À l'heure actuelle, 67 % de l'énergie thermique contenue dans un gallon de carburant diesel s'échappent en pertes de chaleur.

2.5 Entretien et fiabilité

Étant donné que bon nombre des ventes de locomotives sont actuellement financées par crédit-bail pour des raisons fiscales, les fabricants de même que les exploitants profitent des frais d'entretien moins élevés [9]. Les fabricants s'efforcent de faire correspondre leurs produits aux besoins financiers des sociétés ferroviaires. Les études qui précèdent maintenant les achats portent notamment sur l'utilisation ainsi que sur les dimensions des locomotives et sur les exigences relatives aux coûts. Les théories actuelles concernant la conception n'insistent plus sur une puissance accrue, mais plutôt sur une plus grande fiabilité, sur des frais d'entretien moins élevés et sur un accroissement du rendement énergétique.

Les chemins de fer de la classe I aux États-Unis ont obtenu en 1979 un volume de transport net qui était 55 % plus élevé qu'en 1969 pour chaque unité de matériel et de main-d'oeuvre affectée à l'entretien des composantes de la force motrice. Néanmoins, les frais d'entretien ont passé d'une moyenne de 28 000 $ US par année pour chaque unité en 1969 à environ 73 000 $ US par année pour chaque unité en 1979. Ces coûts varient considérablement selon les différentes sociétés ferroviaires et les conditions de fonctionnement [11]. La figure 2.10 montre les frais d'entretien typiques dont pourrait se servir une compagnie qui envisage d'acheter deux nouvelles unités de 3 000 hp pour remplacer quatre anciennes locomotives totalisant 6 000 hp (on suppose que les conditions de fonctionnement peuvent être respectées avec une charge par essieu inférieure). Les valeurs sont exprimées en dollars américains par année pour chaque locomotive, et non par unité. Les courbes montent jusqu'à ce qu'elles tombent brusquement à chaque révision importante, ce qui donne une courbe en dents de scie avec une tendance à la hausse.

Tant pour l'usager que pour le fabricant, on ne cherche plus tellement à accroître la puissance des locomotives, mais plutôt à améliorer la fiabilité, à réduire l'entretien et à augmenter le rendement énergétique.

Tableau 2.3

RÉPARTITION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE
PROVENANT DU CARBURANT DIESEL

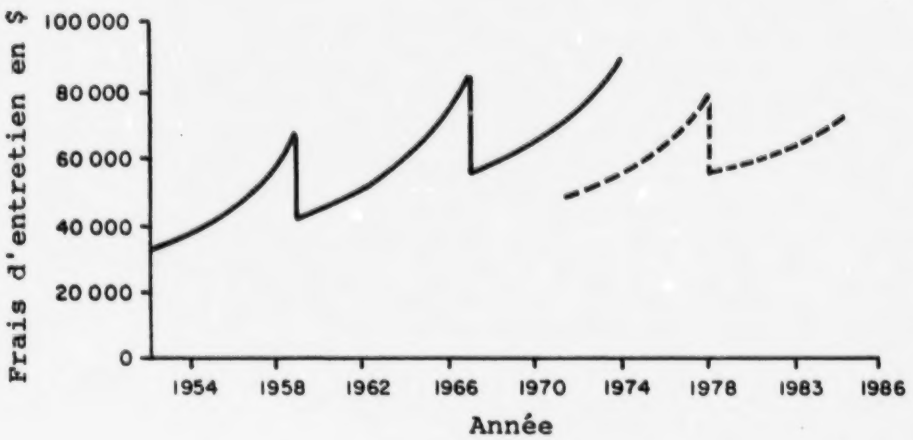
	%
Chaleur d'échappement	31,0
Chaleur de l'eau de refroidissement (dispersée dans les radiateurs)	19,0
Huile de graissage (chaleur)	7,0
Pertes (surtout radiations des moteurs et friction des machines)	9,5
Travail utile	33,5
Total	100,0

En plus d'assurer la traction, le "travail utile" produit par le moteur primaire doit également fournir la puissance à l'équipement auxiliaire des locomotives, comme les ventilateurs de refroidissement, les ventilateurs, les compresseurs et les génératrices auxiliaires. Cet équipement peut utiliser 7 % ou 8 % du travail utile qui est disponible.

Source: [30]

Figure 2.10

FRAIS D'ENTRETIEN DES LOCOMOTIVES



——— Quatre unités de 1 500 hp = 6 000 hp, 100 000 milles/année

---- Deux unités de 3 000 hp = 6 000 hp, 180 000 milles/années

Source: [9]

Les principales composantes d'une locomotive diesel-électrique (moteur, génératrice et moteurs de traction) ont connu une évolution continue et régulière depuis 1936. Chaque modèle successif est devenu plus complexe, modifiant par le fait même les exigences relatives à l'entretien. Les nouveaux modèles comportent non seulement des améliorations au point de vue de la conception, mais intègrent de l'équipement de diagnostic, qu'il soit à bord ou non de la locomotive, pour faciliter la détection des défectuosités.

En augmentant le rendement énergétique des locomotives, on doit éviter que la fiabilité en souffre. Par exemple, un moteur typique de locomotive consomme 360 000 gallons de carburant par année. À 80 ¢ le gallon, une réduction de 1 % de la consommation de carburant dans un parc de 100 locomotives permettrait de réaliser des économies de 280 000 $. Mais si cette économie oblige à accepter une réduction de 1 % au niveau de la disponibilité des locomotives, alors il faudrait acheter une locomotive supplémentaire à un coût de 1 000 000 $. La perte nette de 720 000 $ démontre l'importance de la fiabilité dans la conception des locomotives. C'est là l'une des raisons pour lesquelles l'industrie hésite à accepter les progrès techniques qui n'ont pas la fiabilité démontrée des unités existantes. De façon générale, les sociétés ferroviaires visent une disponibilité de 90 % pour leurs locomotives [30].

Les progrès futurs seront axés vers une plus grande fiabilité, un délai plus long entre les différents services d'entretien qui sont prévus et une réduction des périodes d'arrêt grâce à la possibilité de remplacer des modules. Au lieu de réparer une pièce défectueuse de la locomotive, on cherchera plutôt à l'avenir à remplacer rapidement toute l'unité pour remettre la locomotive en service. On utilisera de plus en plus l'électronique à bord des locomotives et le long des voies pour effectuer les essais, et pour détecter les défectuosités et identifier les mauvais fonctionnements avant qu'ils ne se produisent. Les services d'entretien courants (comme les changements de roues) seront de plus en plus automatisés d'ici cinq ans grâce à la technologie utilisée par l'industrie de l'automobile.

2.6 Locomotives réusinées

Au cours des années 1940 et 1950, les achats de nouvelles locomotives diesel-électriques étaient financés à des taux d'intérêt de 2,75 %. Compte tenu des taux d'intérêt d'aujourd'hui et des coûts de 1 000 000 $ pour une locomotive de ligne ou de 750 000 $ pour une locomotive de manoeuvre [31], bon nombre de sociétés ferroviaires trouvent plus économique de reconstruire d'anciennes locomotives que d'acheter de nouvelles unités.

CP Rail est en train d'améliorer son parc et a le choix entre trois options. La compagnie peut acheter de nouvelles locomotives, conclure des contrats pour faire reconstruire d'anciennes locomotives ou effectuer elle-même la reconstruction. Elle a choisi la troisième option. En reconstruisant 400 de ses propres locomotives à un coût estimatif de 48 000 000 $, elle peut fournir des unités réusinées à un coût d'environ 120 000 $ chacune. Le processus de réusinage comporte les éléments suivants: renforcissement du châssis, reconstruction des moteurs, des bogies et de la suspension, remise à neuf du câblage, amélioration du confort du chauffeur et remplacement d'autres pièces de la locomotive s'il y a lieu. Ce projet fait partie d'un programme de 200 000 000 $ d'une durée de dix ans, visant à améliorer son parc de 1 300 locomotives. Le programme comprend également l'achat de 83 unités de ligne et 77 unités de manoeuvre entre 1982 et 1986 à un coût total de 152 000 000 $.

En 1990, le parc du Canadien Pacifique comprendra "des unités fiables et souples à quatre essieux pour le service de manoeuvre et des unités puissantes à six essieux pour les lignes principales" [10].

CN Rail effectue également ses propres révisions importantes, en remettant à neuf ses locomotives. Par exemple, d'ici la fin de 1981, la compagnie prévoit que toutes ses locomotives de ligne principale auront été équipées d'un système de contrôle de la traction positive. Il s'agit d'un système de contrôle moderne du glissement, qui est décrit plus en détail à la section 2.6.

Aux États-Unis, le département de la mécanique de la Seaboard Coast Line à Tampa en Floride procède à une vaste reconstruction des unités de ligne principale de la première génération. La compagnie remet complètement à neuf une locomotive à quatre essieux par semaine, à un coût qui se situe entre 300 000 $ et 400 000 $ US par unité [93]. Bien que le marché actuel des nouvelles locomotives soit surtout axé sur les unités à six essieux pour manoeuvrer les trains plus lourds ou pour les déplacements dans les régions montagneuses, ces unités à quatre essieux qui ont été reconstruites sont encore convenables pour les déplacements rapides sur des lignes principales et des terrains plats. Il se pourrait qu'elles deviennent de plus en plus populaires à l'avenir. Les unités à quatre essieux consomment environ 80 000 gallons de moins de carburant par année que les unités à six essieux, là où elles peuvent remplacer efficacement ces dernières [32].

À la longue, à mesure que ces locomotives reconstruites parviennent à la fin de leur durée de vie utile de quelque quinze ans, elles seront probablement retirées de la circulation. À ce moment-là, les locomotives de la troisième génération seront près de la fin de leur propre durée de vie utile et fourniront le prochain marché des locomotives réusinées.

2.7 Adhérence des locomotives

Un autre domaine susceptible d'être amélioré est la capacité de la locomotive de "tirer fort sant patiner". Dans bien des cas, le nombre de wagons qui peut être affecté à une locomotive est déterminé non pas par la puissance du moteur mais par la capacité de la roue d'acier de fournir suffisamment de friction contre le rail pour pouvoir tirer la charge sur des pentes ascendantes sans patiner.

Toutes les améliorations qui permettront à une locomotive de tirer des charges plus lourdes sur une pente ascendante constitueront des progrès importants. L'électronique est la technologie qui rend ces progrès possibles. On installe actuellement des systèmes électroniques pour détecter et contrôler le patinage sur les locomotives de la troisième génération. En améliorant l'adhérence de 18 % à 24 % grâce aux nouveaux systèmes de contrôle du patinage, les locomotives modernes auront une capacité de tirage de 33 % supérieure en montant des pentes [25].

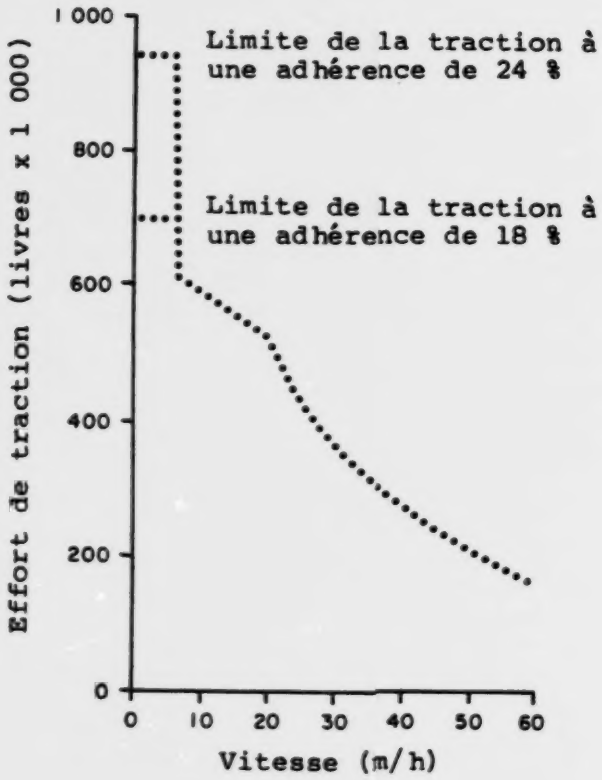
La figure 2.11 illustre l'utilité de niveaux d'adhérence plus élevés pour une locomotive. Le nombre de wagons affectés à une locomotive est déterminé par la charge maximale qu'elle peut tirer en montant la pente la plus raide sur le chemin où le train est envoyé. L'importance de cette charge est déterminée par l'effort de traction que la locomotive peut produire à la limite d'adhérence (point où les roues d'entraînement commencent à patiner). À une puissance constante de la locomotive, à mesure que la vitesse diminue, l'effort de traction augmente jusqu'au moment où les roues commencent à patiner. Il faut alors réduire la puissance de la locomotive pour empêcher ce patinage. La charge des trains est habituellement inférieure à leur capacité maximale. Dans certains cas exceptionnels, le mauvais état des rails et la surcharge du train pourraient concourir à faire arrêter le train sur la pente ascendante.

La limite d'adhérence varie habituellement de 5 à 10 m/h, suivant la puissance nominale et le nombre d'essieux de la locomotive. Dans les parties du parcours autres que les pentes raides, la vitesse de la locomotive est déterminée par la puissance en horse-power qui est disponible plutôt que par l'adhérence.

Les plus récents dispositifs de contrôle du patinage assurent une adhérence maximale en permettant aux roues d'entraînement de glisser à un rythme contrôlé de 1 à 2 m/h par rapport au rail plutôt que d'empêcher tout patinage de la roue sur le rail.

Figure 2.11

EFFORT DE TRACTION CONTRE VITESSE



Pour une locomotive à six essieux de 390 000 livres, le fait d'accroître le coefficient d'adhérence de 18 % à 24 % a pour effet de porter l'effort de traction maximal de 70 000 à 94 000 livres, avant que la locomotive ait à réduire la puissance pour prévenir le patinage sur une pente raide.

Le régulateur de traction [11],[33] a été mis au point sur une période de plusieurs années au Centre de recherche du Canadien National et est maintenant utilisé sur 400 locomotives à quatre essieux. Un permis a été récemment accordé à Vapor Corp. pour qu'elle assure la fabrication et la commercialisation à l'échelle internationale de ce régulateur.

Avec ce système, des mesures de la vélocité de la rotation sont prises à la génératrice couplée aux essieux puis sont traitées de façon électronique en vue de déterminer l'accélération rotative de chaque paire de roues. Lorsqu'une augmentation de cette valeur indique un début de patinage, le système réduit momentanément la puissance de l'alternateur de façon à réduire le patinage, et applique du sable s'il le faut. Les vitesses des essieux différentiels sont également surveillées et utilisées comme facteur de contrôle secondaire.

Le CN a démontré que la traction utilisable augmente d'au moins de 15 % à 20 % avec le régulateur de traction, dans les conditions variées qui caractérisent son service. Le prix prévu de la modification se situe entre 10 000 $ et 20 000 $ par unité, selon le modèle particulier de la locomotive à laquelle le régulateur est rattaché. Les 50 premières unités ont été construites par le Centre de recherche du CN et les autres ont été fabriquées commercialement par Vapor Corp. Le CN vient de commencer à équiper 300 autres unités d'une version à six essieux du régulateur, à un rythme de 50 à 100 locomotives par année, à mesure qu'elles doivent être révisées. La compagnie prévoit que toutes ses locomotives de ligne principale seront équipées du régulateur d'ici la fin de 1981 [32].

General Electric utilise le "Sentry Adhesion System" [11] pour ses nouvelles locomotives à quatre et à six essieux de la troisième génération. Avec ce système, le début de patinage est détecté pour la première fois en observant les vitesses des essieux différentiels à l'aide de génératrices couplées aux essieux. La première correction consiste en une application automatique du sable. S'il se produit encore du patinage (également détecté par un circuit d'accélération angulaire sur chaque essieu), on procède à une deuxième correction en ajoutant à l'application de sable une faible réduction de l'effort de traction; puis, la toute puissance est rétablie graduellement de façon automatique. Un patinage plus prononcé ou une allure excessive du moteur entraîne une réduction plus grande de la puissance et une indication de patinage au tableau de contrôle, puis la puissance est rétablie à mesure que les conditions s'améliorent.

General Electric a mesuré des niveaux d'adhérence d'environ 25 % dans des conditions défavorables des courbes et des voies. La compagnie croit que ces améliorations élargiront considérablement les utilités de l'application pour les unités à quatre essieux de forte puissance.

Le "Micro-Limit Slip Detection System" [11], construit par Bombardier Inc. à Montréal, utilise la génératrice d'arbre de General Electric. Ce système logique à semi-conducteurs utilise à la fois des facteurs d'accélération angulaire et de différence de vitesses pour assurer un fonctionnement fiable dans les zones de patinage à force de traction élevée. Un circuit sommateur assure une réduction de la puissance qui est proportionnelle à la gravité du patinage, ainsi qu'un sablage automatique et le rétablissement subséquent de la puissance. Bombardier prévoit une augmentation de 20 % de l'adhérence réelle par rapport aux locomotives précédentes.

Le système "Super-Series Wheel Creep Control" [11] de General Motors utilise un petit radar à effet Doppler en dessous de la locomotive. Le radar balaie la plate-forme et détermine la vitesse réelle par rapport au sol. Une unité électronique à semi-conducteurs compare cette donnée avec la vitesse des moteurs de traction en vue d'émettre des commandes qui maintiennent le patinage dans certaines limites pour obtenir une force de traction optimale dans l'état des rails. La première correction est une réduction de la puissance: un patinage plus fort fait intervenir le sable. Afin de réduire la consommation de sable, le sablage manuel est automatiquement exclu sauf au démarrage et dans les cas de freinage d'urgence. Se fiant à de nombreux essais sur route, General Motors soutient que l'adhérence est passée de 18 % à 24 %, soit une augmentation de 33 %.

Le système "Pressductor Adhesion Control" est fabriqué par la division électromotrice de General Motors en vertu d'un permis obtenu de la compagnie suédoise ASEA. Ce système est utilisé pour le service passagers à haute vitesse dans le corridor nord-est. Un système semblable est utilisé sur les locomotives électriques de 10 000 hp de la division électromotrice qui servent pour le service captif sur la ligne automatisée entre Black Mesa et Lake Powell en Arizona.

Les locomotives conçues par la compagnie suédoise ASEA font appel à un système de contrôle du patinage qui est basé sur un phénomène de vibration de torsion. Lorsque l'essieu atteint sa limite de patinage contrôlé, une roue commence à patiner et cause une oscillation à la fréquence de résonance de la torsion du montage roue-essieu. Cette vibration est utilisée comme signal du début de patinage. La puissance est alors temporairement réduite. Ce système peut atteindre des niveaux d'adhérence soutenus de 25 % lorsque l'état des rails est mauvais.

En résumé, l'amélioration de l'adhérence roue-rail aura un effet significatif sur les services ferroviaires futurs car elle régit directement le nombre de wagons qu'une locomotive peut tirer en montant. Les systèmes de contrôle de l'adhérence pour les locomotives diesel-électriques utiliseront à l'avenir des contrôles à semi-conducteurs capables de réagir plus

rapidement à des changements des conditions de l'adhérence des roues motrices. Les systèmes de pointe actuels détectent le patinage des roues de diverses façons qui réduisent la puissance de la génératrice principale. Les circuits à semi-conducteurs peuvent réduire immédiatement la puissance des moteurs de traction sans attendre une réduction de la puissance de la génératrice principale afin de prévenir le patinage avant qu'il ne se produise. Il est également possible de contrôler la puissance aux essieux individuels plutôt que de réduire la puissance à tous les essieux ou aux paires d'essieux. Ce facteur est particulièrement important lorsqu'une locomotive démarre. Au départ, le transfert de poids entre l'essieu moteur et l'essieu porteur va de 15 % à 25 % de la charge normale de l'essieu [28]. Les futurs systèmes d'adhérence devraient également viser à réduire la vibration de torsion dans un essieu moteur lorsqu'il atteint sa limite d'adhérence de manière à réduire la fatigue et les ruptures possibles.

Des locomotives fournissant des niveaux d'adhérence de 30 % seront possibles dans l'avenir. Ce rendement accroîtrait de 25 % l'effort de tirage comparativement aux unités d'aujourd'hui qui sont équipées d'un système de contrôle du patinage et de 66 % par rapport aux anciennes unités qui ne sont pas équipées d'un tel système.

2.8 Traction à courant alternatif

Depuis l'avènement de la locomotive diesel dans les années 1940, les moteurs de traction ont évolué de façon constante et régulière. Les locomotives d'aujourd'hui sont propulsées par des moteurs de grande puissance à courant continu qui sont montés sur chaque essieu et sont actionnés par la génératrice ou l'alternateur à courant continu et le redresseur de la locomotive diesel. Les balais de contact qui sont utilisés pour transmettre la puissance à un moteur de traction à courant continu ont le défaut de transmettre des courants forts à une autre tension, ce qui produit souvent de l'usure et cause parfois une panne électrique importante dans les moteurs.

Grâce à la mise au point de dispositifs à semi-conducteurs à rendement élevé et à haute tension, comme les thyristors, on dispose de la technologie nécessaire pour transformer un moteur à courant continu en un moteur à courant alternatif, plus robuste et plus fiable. Ce progrès est retardé par le fait que les thyristors de la taille nécessaire sont très dispendieux. En conséquence, le moteur à courant alternatif ne peut pas encore être justifié sur le plan économique. Cependant, comme dans le cas des autres techniques à semi-conducteurs, la technologie de pointe progresse rapidement et l'économie des moteurs à courant alternatif pour la propulsion des trains favorisera son utilisation pour les locomotives futures.

La mise au point du moteur de traction à courant alternatif remonte aux premières recherches qui ont été effectuées en Allemagne en 1965. Elle repose sur l'idée d'élaborer un système d'entraînement universel qui soit approprié à la fois pour le service voyageurs et le service de marchandises lourdes. Le premier prototype était une locomotive diesel-électrique à six essieux de 2 500 hp, construite en 1971 par la société Brown, Boveri et Compagnie AG à Mannheim, en Allemagne de l'Ouest [34]. À l'heure actuelle, des évaluations opérationnelles des locomotives à traction triphasée sont effectuées dans six pays de l'Europe. Le Centre de développement des transports de Transports Canada à Montréal finance des études et des recherches canadiennes sur la traction à courant alternatif depuis 1975. Ces recherches visent à mettre au point une version appropriée pour les chemins de fer de l'Amérique du Nord [35]. Des locomotives d'un prototype opérationnel devraient faire leur apparition en Amérique du Nord d'ici cinq à dix ans.

Cet intérêt croissant pour la traction à courant alternatif s'explique en grande partie par le fait qu'elle ne comporte pas de commutateur (dans un moteur d'induction, aucun courant ne doit être transmis à un rotor en mouvement) et offre donc les avantages suivants [36],[34]:

a) l'entretien est réduit car il n'y a pas de commutateurs à inspecter, de balais à remplacer ou de porte-balais à entretenir; en raison de sa construction robuste, ce système est particulièrement approprié pour le dur climat canadien;

b) son poids plus léger permet au moteur de rouler plus vite et de produire plus de puissance;

c) il n'y a aucune perte de puissance à vitesse élevée car il n'y a pas d'accumulation de tension de réactance dans un commutateur;

d) la capacité est accrue pour le freinage par récupération car aucun commutateur ne vient imposer une limite à la puissance durant le freinage;

e) le coût initial est moins élevé;

f) le passage de la traction au freinage constitue une fonction naturelle du moteur; le freinage rhéostatique peut être assuré jusqu'à la vitesse zéro; et

g) l'usure des boudins et des rails est réduite à cause d'un poids sans ressort moins élevé (un bogie classique pèse 22 tonnes tandis que le système à courant alternatif pèse 15 tonnes).

L'inconvénient du système est qu'il exige des contrôles perfectionnés à fréquence variable triphasée. Il faut utiliser l'électronique à semi-conducteurs pour contrôler à la fois la fréquence et la tension de l'alimentation des moteurs. Dans le cas des lignes électrifiées, on doit prendre des mesures pour réduire l'interférence par induction qui peut perturber l'équipement de communication et, dans certains cas, accumuler des tensions induites dangereuses dans d'autres conducteurs parallèles à la caténaire de la locomotive.

2.9 Locomotives télécommandées

Afin de fournir une puissance de traction supplémentaire pour accroître la capacité des trains sur les pentes raides, bon nombre de sociétés ferroviaires ont introduit des locomotives télécommandées qui sont insérées dans le corps du train. Sur la ligne principale de CP Rail entre Calgary et la côte du Pacifique, les trains doivent franchir quatre chaînes de montagnes qui comportent des pentes d'une inclinaison pouvant aller jusqu'à 2,2 %. Sur la plus abrupte de ces pentes, le tonnage maximum pour un train classique tiré par quatre unités à six essieux est de 4 535 tonnes. Si on insère une rame de 3 unités avec un contrôle manuel séparé, il est possible de faire monter une pente de 2,2 % à un train de 7 620 tonnes [37]. On utilise des unités télécommandées depuis 1969 sur ce territoire. Avec une rame à quatre unités, on fait passer actuellement sur ce trajet des trains totalisant 12 000 tonnes.

Dans un mouvement lent et continu, comme pour monter une longue pente, le jeu qui peut exister entre les wagons ne constitue pas un problème. Il est plus prononcé là où il y a du roulement, car le mouvement de va-et-vient entre les wagons peut produire des forces suffisamment fortes pour rompre les attelages qui joignent les wagons. En enlevant une ou plusieurs unités de la tête et en les plaçant plus à l'arrière du train sous un contrôle par radio, on réduit le problème de jeu entre les wagons. La compagnie Quebec North Shore and Labrador Railroad, par exemple, a pu porter de 165 à 280 le nombre des wagons dans ses opérations. Elle peut ainsi accroître sa capacité sans avoir à recourir aux doubles voies ou à d'autres mesures.

Sur les lignes de CN Rail, la configuration des voies n'exige pas le même effort de traction pour gravir les pentes. Par conséquent, avec des trains qui comportent actuellement environ 110 wagons, la compagnie n'a pas besoin d'unités télécommandées. Si le train devait comprendre jusqu'à 150 wagons, alors des unités télécommandées seraient requises. La longueur du train est souvent déterminée par la capacité des points de chargement et de déchargement et par la longueur des voies d'évitement.

Comparativement à la locomotive de tête conventionnelle, la locomotive télécommandée qui se trouve au milieu du train offre les avantages suivants:

a) augmentation du tonnage du train,

b) meilleur contrôle du jeu,

c) meilleure réaction des freins,

d) réduction de la distance d'arrêt, et

e) charge plus rapide du système de freins.

Lorsque la locomotive télécommandée applique les freins en même temps que la locomotive de tête, le temps global requis pour le freinage est réduit de 50 %.

L'utilisation de locomotives télécommandées est particulièrement intéressante par temps froid lorsque les fuites d'air plus nombreuses dans les conduites des freins viennent réduire considérablement la longueur des trains classiques. La figure 2.12 montre les avantages de la télécommande par temps froid.

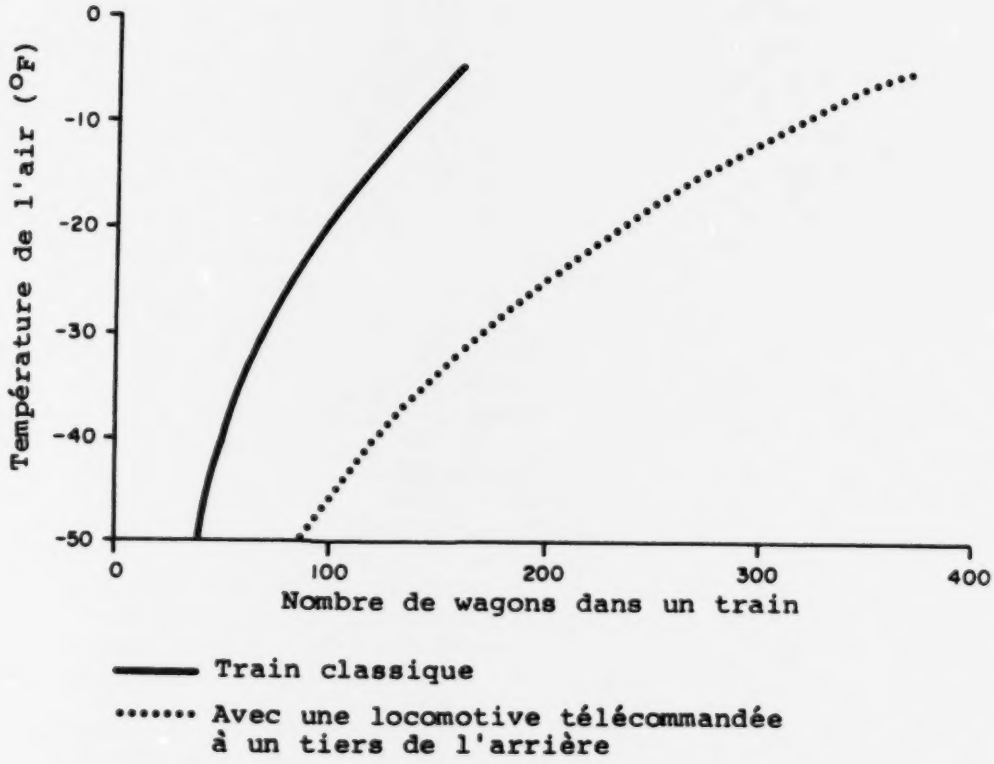
Lorsqu'on utilise des rames télécommandées, il n'est pas nécessaire ni toujours souhaitable de les faire fonctionner simultanément avec les unités de tête. Il s'agit là d'un concept important dans le domaine de la télécommande, connu sous le nom de "noeud". C'est le point où les wagons, tirés par un ensemble de locomotives, rencontrent ceux qui sont poussés par l'ensemble suivant. Ce phénomène est illustré à la figure 2.13.

L'emplacement et le contrôle du noeud sont importants pour prévenir les défaillances d'attelages qui sont causées par les mouvements de va-et-vient. Très fréquentes au début de l'utilisation des unités télécommandées, ces défaillances ont été éliminées grâce à un bon contrôle indépendant de ces unités.

L'un des inconvénients de ce système est la perte qui se produit sur le plan de l'économie de carburant, car la puissance maximale de toutes les unités n'est requise qu'une faible partie du temps. Les rames à plusieurs locomotives passent une bonne partie de leur temps avec l'étrangleur de toutes leurs unités ouvert en position intermédiaire. La position 8, qui est le réglage pour la puissance la plus élevée, est la plus efficace pour les unités à turbocompression. Un dispositif de contrôle de l'étrangleur pour les unités multiples, connu sous le nom d'économiseur de carburant, et utilisé pour tenir un sous-ensemble de locomotives à la position 8 (avec les autres à la position 1) chaque fois que l'effort de traction qui en résulte correspondrait à celui de toutes les unités dans une position intermédiaire. On trouve une description de ce dispositif à la section 2.4.

Figure 2.12

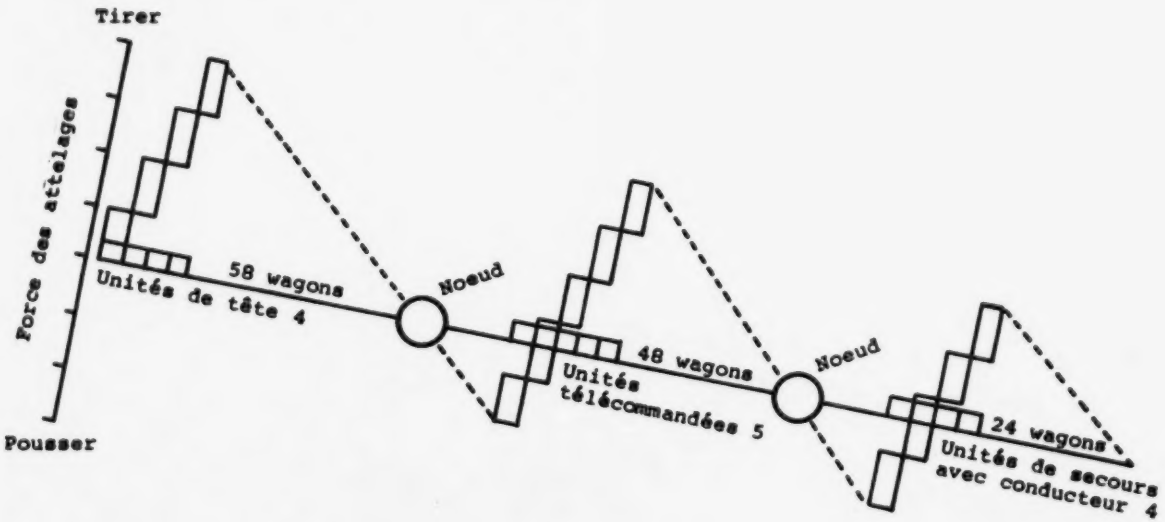
AVANTAGES DES LOCOMOTIVES TÉLÉCOMMANDÉES
POUR ACCROÎTRE LA LONGUEUR DES TRAINS EN HIVER



Source: [37]

Figure 2.13

DIAGRAMME DE LA FORCE DES ATTELAGES D'UN SYSTÈME 4-5-4
TIRANT 130 WAGONS SUR UNE PENTE DE 2,2 %



Dans une opération équilibrée (toutes les parties du train se déplaçant à la même vitesse), les deux noeuds se trouvent à une distance sûre à l'avant de la locomotive télécommandée et de la locomotive assistée.

Source: [37]

L'avènement de l'ordinateur, qui a été introduit à bord des locomotives en 1980 [38], constitue la plus récente innovation en vue d'améliorer la manoeuvre des rames à unités commandées par radio. L'ordinateur a pour but de fournir au mécanicien, qui se trouve dans l'unité de tête, des renseignements sur les unités sans équipage concernant la performance et les mauvais fonctionnements, renseignements qui sont normalement affichés sur les instruments de la cabine. Comme avantages de ce système, on prévoit donc une économie accrue de carburant, en raison d'un meilleur contrôle des trains, et une réduction de l'entretien, par suite d'une meilleure détection des défaillances.

2.10 Autres composantes

La question des rapports entre la roue et le rail, tant pour les locomotives que pour les wagons de marchandises, a fait l'objet de recherches constantes.

Les objectifs visés consistent à réduire l'usure des roues et des rails que causent les lourdes charges par essieu qu'on connaît aujourd'hui et à accroître la sécurité en réduisant les défaillances dues à la fatigue, tant pour les composantes des rails que pour celles des véhicules.

L'un des futurs progrès sera le bogie à essieux directeurs de type II (décrit plus en détail à la section 5.4), qui réduit le "stress" sur les parties courbées de la voie.

Les locomotives auront des roues d'un diamètre plus grand (52 pouces), comparativement aux roues actuelles (40 pouces), ce qui réduira l'usure des rails, améliorera la traction et augmentera la durée des roues. Les roues des locomotives durent généralement de 12 à 42 mois, ou de 200 000 à 400 000 milles, selon le service. Elles peuvent être réusinées deux fois au cours de cette période avant d'être mises au rancart [30].

Les charges par essieu des locomotives demeureront les mêmes, soit environ 62 000 livres par essieu. Si on augmente éventuellement les charges par essieu en vue d'accroître l'effort de traction, alors il faudra aussi améliorer les voies et les plates-formes pour prévenir les dommages. Une locomotive typique à quatre essieux pèse actuellement 250 000 livres et une locomotive à six essieux, 368 000 livres.

Des compagnies de produits chimiques sont apparemment en train de mettre au point des solutions antigel qui pourraient être utilisées comme réfrigérants de locomotives. Cette innovation, de même que des contrôles modernes pour les purges de moteur (voir la section 2.4), permettront d'arrêter les locomotives lorsqu'elles ne sont pas utilisées par temps froid. À l'heure actuelle, le coût pour fournir environ 300 gallons de

réfrigérants par moteur est élevé. Cependant, la principale raison de ne pas utiliser l'antigel est le risque d'infiltration d'éthylèneglycol dans l'huile à carter. Il s'ensuivrait une détérioration rapide de l'huile et, par conséquent, des dommages aux moteurs [13].

Le système de freinage des trains de marchandises comprend les freins à air normaux et les freins rhéostatiques du moteur. Les freins normaux utilisent un compresseur à bord de la locomotive, qui fournit de l'air pour appliquer les freins à friction sur la locomotive et sur chacun des wagons. La plus récente innovation dans ce domaine consiste à utiliser des microprocesseurs pour ajuster l'effort de freinage à chaque wagon, en fonction du poids transporté.

À l'origine, les freins rhéostatiques servaient uniquement dans les régions accidentées ou montagneuses. Avec les progrès techniques, il est maintenant possible de les utiliser efficacement sur les routes sinueuses. Dans ce mode de fonctionnement, les moteurs de traction des locomotives agissent comme génératrices (qui offrent une résistance à la rotation). L'énergie électrique qui est produite est diffusée comme chaleur par les éléments de la grille des freins rhéostatiques sur le côté de la locomotive. Si on adopte à l'avenir les moteurs de traction à courant alternatif, il en découlera deux avantages. Premièrement, le freinage rhéostatique est une fonction naturelle du moteur à courant alternatif, alors que le moteur à courant continu doit être commuté. Deuxièmement, le freinage rhéostatique se poursuit jusqu'à la vitesse zéro, alors que les moteurs à courant continu atteignent leur efficacité maximale entre 18 et 25 m/h [39]. Les améliorations futures des freins rhéostatiques viseront à élargir la gamme de vitesses à laquelle ils sont efficaces et peut-être, à long terme, à trouver une façon de stocker l'énergie des freins rhéostatiques à partir des moteurs à courant alternatif ou à courant continu.

Le principal problème en ce qui a trait au freinage des trains est le temps de réaction des systèmes à air dans les longs trains. Les systèmes futurs utiliseront peut-être des couplages inductifs entre les wagons, qui transmettent un signal électrique pour activer les freins à air sur chaque wagon sans subir les délais d'un système entièrement à air. Il est possible que cette solution présente un problème de compatibilité entre ces freins conventionnels. L'établissement d'une connexion électrique sur toute la longueur du train constituera probablement un progrès important, car elle permettra en même temps d'exercer beaucoup d'autres fonctions de contrôle et de surveillance. Un bon exemple de cela est la présence à bord de la cabine de la locomotive de détecteurs pour repérer les coussinets surchauffés (ou boîtes chaudes). Le surchauffage des coussinets des essieux est une des principales causes des défaillances des essieux et des déraillements subséquents des trains. Les anciens trains de marchandises, qui ont des coussinets solides, sont plus susceptibles de connaître des

défaillances que les nouveaux trains, qui ont des coussinets à rouleaux. Il n'est pas pratique d'équiper tous les trains de marchandises avec des coussinets à rouleaux et, par conséquent, la détection du surchauffage est considérée comme la meilleure solution de rechange.

2.11 Résumé

Depuis l'avènement des premières locomotives diesel-électriques en 1948, quelque 3 100 unités diesel ont remplacé 5 000 machines à vapeur comme source de puissance motrice. Par suite de l'arrivée du turbocompresseur actionné par les gaz d'échappement en 1959, les diesels de la deuxième génération ont fait un bond en avant sur le plan de la puissance. La tendance vers une augmentation constante de la puissance s'est maintenue jusqu'à ce que les prix du carburant commencent à grimper rapidement en 1973. Les innovations plus récentes ont visé à améliorer l'écomnomie de carburant, la fiabilité et l'entretien plutôt qu'à accroître la puissance. Les locomotives diesel-électriques de la troisième génération qui sont actuellement mises sur le marché par les trois grands fabricants nord-américains comprennent les caractéristiques suivantes:

a) une augmentation de 7 % sur le plan de l'économie de carburant;

b) des systèmes de diagnostic à bord pour détecter les défaillances ou les mauvais fonctionnements, et une plus grande utilisation des microprocesseurs pour contrôler et surveiller la performance des trains; et

c) des sytèmes perfectionnés pour le contrôle du patinage des roues, qui permettent aux locomotives de tirer des charges pesant jusqu'à 33 % de plus en montant des pentes.

D'autres économies de carburant sont également réalisées grâce à un meilleur contrôle du fonctionnement et de l'entretien des trains, et une meilleure formation des conducteurs sur des simulateurs de trains.

La locomotive de ligne principale coûte actuellement en moyenne 950 000 $ et dure de quinze à vingt ans. La reconstruction de locomotives à un coût d'environ 200 000 $ chacune est une solution de plus en plus populaire, en raison du coût élevé des nouvelles unités.

Les progrès futurs ne devraient pas faire appel à des techniques radicalement différentes avant 1985. Les innovations qui sont actuellement au stade de la recherche pourraient être mises en oeuvre à moyen ou à long terme. De nouveaux carburants sont actuellement mis à l'essai sur des moteurs de locomotives

grandeur naturelle. Des locomotives bimodales, capables de fonctionner au diesel et à l'énergie électrique, sont encore à l'étude. Elles pourraient être utilisées pour l'électrification des pentes raides, au lieu d'une électrification complète des lignes principales. Les systèmes de stockage de l'énergie le long des voies constituent une technique à long terme qui est compatible avec l'électrification sur les pentes prononcées. L'énergie d'un train qui descend est conservée grâce au freinage par récupération et stockée dans un volant latéral pour être utilisée par le prochain train qui montera la pente.

Il pourrait être possible d'accroître de 20 % la puissance maximale des moteurs actuels sans augmenter la consommation de carburant en récupérant l'énergie des gaz d'échappement et en l'utilisant pour faire fonctionner une turbine à cycle de Rankine. Il s'agirait là d'une étape importante en vue d'améliorer l'efficacité du moteur diesel.

En résumé, les innovations les plus importantes à court terme sont celles qui ont trait au rendement énergétique et, à plus long terme, aux nouveaux carburants et aux locomotives. Étant donné les coûts élevés du capital et de la main-d'oeuvre, les innovations qui améliorent la productivité ainsi que la disponibilité et l'entretien des locomotives viennent en deuxième place. Enfin, les progrès techniques qui augmentent la puissance de la locomotive sans accroître l'économie de carburant ou la fiabilité ont généralement perdu la faveur des exploitants.

Chapitre 3

CARBURANTS DE RECHANGE

3.1 Introduction

Les carburants de rechange pour la puissance motrice des trains existent depuis de nombreuses années. On commence à peine à s'y intéresser vraiment, par suite de certaines inquiétudes concernant les fournisseurs de produits énergétiques. Les carburants de rechange peuvent être répartis dans les grandes catégories suivantes: les carburants de remplacement, les carburants hybrides, les carburants hors spécifications (ou combinés dans une coupe large) et les carburants synthétiques.

Les carburants de remplacement substituent une autre forme d'énergie (par exemple, l'hydrogène) au carburant diesel n° 2 qu'utilisent actuellement les sociétés ferroviaires. Ces carburants rendraient nécessaires d'importantes modifications aux centrales énergétiques.

Les carburants hybrides combinent le carburant diesel et d'autres carburants liquides (par exemple, l'alcool) en vue d'allonger le carburant diesel. Les carburants hybrides entraînent normalement des modifications mineures aux moteurs.

Les carburants hors spécifications sont tout simplement un carburant diesel dont on a élargi la gamme des caractéristiques acceptables en vue d'accroître la quantité de carburant obtenue du processus de raffinage. Ce type de carburant exige peu de modifications aux moteurs.

Les carburants synthétiques sont semblables au carburant diesel n° 2 mais proviennent de sources non conventionnelles, comme les sables bitumineux, l'huile de schiste et le charbon. Le carburant diesel tiré des sables bitumineux satisfait déjà à 6 % des besoins des sociétés ferroviaires du Canada [2] et ne nécessite aucune modification des moteurs.

3.2 Historique

Dans les années 1940, le passage du moteur à vapeur chauffé au charbon à la locomotive diesel a eu pour effet de sextupler le rendement énergétique des locomotives. Des locomotives à turbine chauffées au charbon et au propane ont déjà été utilisées dans le passé, mais elles ont dû éventuelle-

ment être retirées de la circulation à cause de certains problèmes de fonctionnement. Les conservationnistes de l'énergie favorisent maintenant l'électrification des chemins de fer, mais les compagnies ne disposent pas des capitaux nécessaires pour effectuer les investissements initiaux considérables qui sont requis (l'électrification est abordée plus en détail au chapitre 4).

Les recherches actuelles visent à mettre au point des carburants de remplacement qui peuvent être utilisés dans les moteurs diesel existants sans entraîner une perte de rendement ni nécessiter des modifications importantes des moteurs. Des recherches ont également eu lieu concernant les effets à long terme sur les moteurs et les modifications appropriées du matériel. CN Rail collabore avec le South West Research Institute de San Antonio au Texas pour étudier les problèmes que pose le fonctionnement de locomotives diesel à vitesse moyenne à l'aide de différents carburants et les difficultés que représente la modification des moteurs pour utiliser ces carburants. Il est difficile d'établir l'orientation que devrait prendre la mise au point de carburants de rechange car elle est déterminée par les prix relatifs et la disponibilité des carburants possibles. La mise en oeuvre des carburants de rechange ne se fera que dans un avenir à moyen terme, soit d'ici cinq à dix ans.

Les choix actuellement possibles pour les carburants de rechange sont les suivants: les carburants hybrides, qui combinent le diesel et d'autres carburants; les carburants de remplacement, qui remplacent complètement le carburant diesel; et les carburants hors spécifications, qui sont des carburants diesel ayant une gamme de spécifications plus large.

3.3 Carburants hybrides

Les carburants hybrides combinent le carburant diesel et une autre matière combustible, créant ainsi un mélange approprié qui peut être utilisé dans les moteurs diesel classiques. Comme exemples de carburants hybrides, mentionnons les solutions alcooliques qui sont utilisées pour allonger le carburant diesel. L'alcool, par exemple, est mélangé au carburant diesel dans les conduites de carburants puis injecté dans le moteur grâce à un système d'injection simple. La quantité d'alcool qui peut être utilisée sans qu'il y ait une perte de puissance varie de 12 % à 32 % des besoins énergétiques, suivant la puissance et selon qu'on utilise de l'éthane ou du méthane [40]. Le facteur restrictif est le cognement du moteur qui réduit le rendement du moteur et sa fiabilité avec des mélanges plus élevés.

Des mélanges encore plus élevés, pouvant aller jusqu'à 90 % d'alcool, sont possibles, mais ils nécessitent des modifications importantes des moteurs (voir la section 3.4). À

ce taux de substitution, l'alcool devient lui-même un carburant de remplacement.

Les alcools ont une chaleur de combustion plus faible et offriront donc une consommation spécifique de carburant plus élevé pour la même puissance, comparativement au carburant diesel pur. Voici leur enthalpie respective:

Diesel	20 000 B.T.U./lb
Alcool éthylique	13 000 B.T.U./lb
Alcool méthylique	9 600 B.T.U./lb

On ne connaît pas encore les effets à long terme sur les moteurs et les modifications du matériel qui sont requises pour les carburants hybrides, mais des recherches intensives ont actuellement lieu au South Western Research Institute [40].

3.4 Carburants de remplacement

Les carburants non conventionnels, comme les combustibles alcooliques et gazeux purs, ne peuvent pas être utilisés dans les moteurs diesel classiques sans d'importantes modifications. Par exemple, il faudrait soit ajouter un système d'allumage, soit installer un deuxième système d'injection pour introduire de faibles quantités de carburant diesel en vue de provoquer l'allumage.

Voici quelques-uns des carburants de remplacement qui peuvent être utilisés dans les moteurs diesel: l'hydrogène, le propane, l'alcool, le gaz naturel liquide, les suspensions de charbon dans l'huile et le carburant diesel synthétique (voir la section 3.5). Il est également possible d'utiliser dans les moteurs de type autre que diesel, d'autres formes d'énergie, comme le charbon, l'électricité (voir le chapitre 4) et les produits pétroliers autres que le carburant diesel.

L'hydrogène offre des possibilités intéressantes pour l'avenir comme carburant de remplacement. Il a une enthalpie de 31 000 B.T.U./lb, comparativement à 20 000 B.T.U./lb pour le carburant diesel. L'hydrogène est plus difficile à produire, à manipuler et à distribuer en raison de sa faible densité (il est davantage sujet aux fuites que d'autres gaz). Il possède cependant une enthalpie élevée, offre une combustion propre et n'est pas à base de pétrole. L'hydrogène peut être utilisé pour faire fonctionner les locomotives diesel, mais il exige des modifications des moteurs plus importantes que dans le cas des mélanges de carburant diesel et d'alcool [41]. Le coût unitaire de l'énergie pour l'hydrogène est également trois fois plus élevé que celui du carburant diesel, selon une estimation de 1977. Cet écart se réduira à l'avenir, à mesure que s'améliore la technologie pour produire l'hydrogène.

Comme carburant de trains, l'hydrogène présente certains problèmes car il doit être transporté sous forme liquide cryogénique dans un "tender d'hydrogène". Il s'agit habituellement d'un réservoir à vide, à double cloison et à faible pression. Un "tender" contenant 3 200 gallons de carburant diesel pèse environ 79 000 livres brutes et coûte 120 000 $.

Les tenders de carburant ajoutent du poids mort, non utilisable pour la traction, et rallongent les rames. De plus, ils peuvent présenter des problèmes pour la sécurité en cas de collision. Au lieu de l'entreposage sous forme gazeuse ou liquide, il est également possible de recourir aux hydrures d'hydrogène. Mais ce processus n'a pas encore été pleinement étudié.

Un rapport publié en 1976 prédisait que l'hydrogène fournirait 11,8 % des besoins en énergie dans le secteur des transports d'ici l'an 2000 [43]. L'utilisation future de l'hydrogène dépendra cependant en grande partie de son coût de production. Son coût élevé constitue actuellement l'obstacle principal.

On a mis à l'essai en laboratoire des combustibles alcooliques en remplaçant par du méthanol jusqu'à 90 % du carburant exigé par un moteur diesel [40]. Le carburant diesel fournit 10 % de l'énergie afin de provoquer la combustion dans le moteur diesel. Ce procédé est nécessaire car la conception actuelle des moteurs ne prévoit pas de système d'allumage distinct. Comme il a été mentionné à la section 3.3, le méthanol a une enthalpie égale à 50 % de celle du carburant diesel. À un taux de substitution de 90 %, ce facteur accroîtra de 45 % la consommation de carburant pour la même puissance.

D'autres types de moteurs ont également permis d'utiliser des carburants de remplacement. À la section 2.3, il a été question d'un projet de machine à vapeur moderne chauffée au charbon. La locomotive atteint un rendement thermique de 15 %, comparativement à 30 % pour le moteur diesel. On a évalué que les coûts de l'énergie sont inférieurs de 33 % à ceux d'une unité diesel comparable, selon les prix de 1980.

Les locomotives à turbine de General Electric/ALCO qui ont été utilisées par Union Pacific de 1951 à 1968 étaient alimentées à l'aide d'un mazout de soute "C" de grade inférieur (voir la section 2.3). La turbine à gaz possède la capacité de brûler différents carburants, y compris le propane, le gaz naturel, le carburant de résidu, le pétrole brut, etc. Le gaz naturel liquéfié est celui qui présente les possibilités les plus intéressantes, car il permet d'éviter les problèmes du passé en ce qui concerne les accumulations de cendres dans les turbines. Le rendement des turbines diminue rapidement au-

dessous de la puissance maximale et, sur un cycle d'utilisation typique, correspondrait à environ 50 % du rendement du diesel. L'utilisation de la puissance des turbines et des carburants dépendra en grande partie de la disponibilité des carburants pour les diesels classiques. Il n'est pas possible de considérer la turbine comme un moteur qui permettra d'économiser de l'énergie, à moins qu'on ne puisse améliorer son rendement par rapport à la puissance des diesels.

3.5 Carburants hors spécifications

Les carburants diesel hors spécifications ont été définis comme des carburants dont une ou plusieurs des propriétés ne correspondent pas aux spécifications actuellement acceptées [28].

Si les spécifications quant au contenu et à la qualité du carburant diesel n° 2 peuvent être relâchées ou élargies, alors les exigences relatives au raffinage pourront être réduites. Il s'ensuivrait une augmentation de l'efficacité du processus de raffinage, qui permettrait un rendement supérieur de 5 % pour raffiner le pétrole brut en un carburant hors spécifications ayant une gamme plus large de caractéristiques [40],[44].

Il faudrait alors utiliser une gamme plus variée de spécifications pour l'indice de cétane, la viscosité, le point d'ébullition et la teneur en soufre afin de réduire le nombre des étapes requises pour le processus de raffinage.

3.6 Carburants synthétiques

Les carburants synthétiques sont des produits raffinés du pétrole brut tiré de sources pétrolières non conventionnelles, comme l'huile de schiste, les sables bitumineux et le charbon. Le carburant diesel qui est raffiné à partir de ces pétroles bruts synthétiques est semblable au carburant diesel classique et peut être utilisé sans modifier considérablement les moteurs. L'huile de schiste et l'huile des sables bitumineux sont extraites en chauffant les mélanges afin de libérer l'huile. L'huile peut également être tirée du charbon grâce au processus d'hydrogénation. Ce processus consiste à combiner le charbon et l'hydrogène de manière à produire un pétrole brut synthétique.

Le carburant synthétique tiré du charbon a été utilisé en laboratoire afin de remplacer 90 % de l'énergie du carburant diesel sans avoir à apporter des modifications importantes au moteur ni à subir une perte de puissance significative.

Au Canada, le pétrole brut synthétique tiré des sables bitumineux est également utilisé pour fournir 6 % du carburant consommé par l'équipement ferroviaire, d'après des statistiques

de 1978 [2]. Les prix de 1978 montrent le prix de ce carburant à 43,6 ¢ le gallon, ce qui est moins que le prix du carburant diesel à 50,4 ¢ le gallon. Le pétrole brut synthétique qui est utilisé comme charge d'alimentation pour les raffineries a un prix moins élevé car il est classé comme pétrole brut pour les fins de l'impôt. Les caractéristiques des carburants tirés du brut plus léger de l'huile des sables bitumineux sont telles qu'ils peuvent être brûlés dans les locomotives diesel, avec peu ou pas de modifications.

Aux États-Unis, le carburant diesel tiré de l'huile de schiste par le processus PARAHO est essentiellement identique au carburant diesel n° 2 classique [40]. Il a été mis à l'essai dans les moteurs diesel marins mais, autant que l'on sache, il n'a pas été beaucoup utilisé dans les locomotives.

3.7 Résumé

Les carburants de rechange pour la puissance motrice des trains peuvent être classés dans les grandes catégories suivantes: carburants hybrides, carburants de remplacement, carburants hors spécifications et carburants synthétiques.

Les carburants hybrides qui contiennent de l'alcool et du carburant diesel peuvent remplacer par de l'alcool méthylique ou éthylique entre 12 % et 32 % des besoins énergétiques du moteur, sans perte de puissance. Des mélanges plus élevés nécessiteront des modifications importantes des moteurs. L'enthalpie de l'alcool s'élève à environ 50 % de celle du carburant diesel. Ce facteur aura pour effet d'accroître en conséquence la consommation de carburant afin de maintenir la puissance. Les carburants hybrides apparaîtront probablement dans des prototypes de locomotives d'ici les cinq prochaines années.

Les carburants de remplacement, qui remplacent complètement le carburant diesel, rendront nécessaires d'importantes modifications des moteurs ou l'introduction de nouveaux types de moteurs. Le meilleur carburant de remplacement semble être l'hydrogène. Celui-ci a une enthalpie supérieure de 50 % à celle du carburant diesel et est d'une combustion très propre. Parmi ses points faibles, mentionnons son coût de production élevé et la difficulté de manipuler le combustible gazeux. L'utilisation de l'hydrogène pour la puissance motrice en est encore au stade du laboratoire.

D'autres carburants de remplacement, comme le charbon, l'alcool et différents produits pétroliers, font également l'objet de recherches. Il est possible d'utiliser l'alcool, pour remplacer jusqu'à 90 % de l'énergie du carburant diesel, moyennant des modifications importantes des moteurs et sans perte de puissance importante.

Les carburants hors spécifications qui sont utilisés pour les locomotives sont en fait des carburants diesel pour lesquels les spécifications ont été relâchées afin d'élargir la gamme de carburants pouvant appartenir à cette catégorie. Ceci permettra une augmentation estimative de 5 % du rendement du processus de raffinage pour les carburants diesel en réduisant le nombre d'étapes requises pour le raffinage. Ce carburant nécessitera très peu de modifications aux moteurs diesel existants. Des prototypes de locomotives utilisant ces carburants devraient apparaître d'ici cinq ans.

Les carburants synthétiques sont des carburants qui satisfont aux normes actuelles du diesel mais qui sont tirés de sources non conventionnelles, comme les sables bitumineux, l'huile de schiste ou le charbon. L'huile des sables bitumineux assure actuellement l'alimentation de 6 % des locomotives du Canada. Ces carburants ne nécessitent à peu près aucune modification des moteurs.

On effectue actuellement des essais en laboratoire sur différents carburants de rechange afin de déterminer les modifications qui sont nécessaires ainsi que les effets à long terme de ces carburants sur les moteurs actuels. Les transports futurs de carburant comprendront probablement une gamme variée de types de carburants plutôt qu'une forme en particulier. L'industrie ferroviaire favorisera un nombre limité de carburants de rechange afin de standardiser le plus possible l'équipement et les installations.

Chapitre 4

ÉLECTRIFICATION

4.1 État de la question

L'un des progrès qui aura la plus grande portée dans un avenir prévisible est l'électrification des lignes principales pour les deux grandes sociétés ferroviaires du Canada. Ce changement permettrait de remplacer la plus grande partie des locomotives diesel-électriques actuelles par des locomotives entièrement électriques. L'électrification ne dépend pas de la technologie, car celle-ci est déjà utilisée sur 13 % des chemins de fer du monde. Bien que les coûts d'exploitation d'un système électrifié soit inférieurs, le coût initial élevé de la puissance motrice, des caténaires et des autres composantes fixes entrave sa mise en oeuvre. Il semble inévitable que les premières étapes de l'électrification seront terminées en Amérique du Nord d'ici la fin du siècle. Rien n'indique que les prix des carburants pétroliers ne continueront pas de croître par rapport à l'électricité. À l'avenir, il est possible que les carburants de rechange soient réservés pour d'autres modes de transport. De plus, le passage à la puissance électrique est conforme aux objectifs nationaux à long terme visant à obtenir la sécurité en matière énergétique et à réduire la dépendance envers le pétrole étranger. L'électrification des lignes principales à forte circulation pourrait réduire de 50 % la consommation de carburant diesel. Cependant, les coûts initiaux sont de l'ordre de 600 000 $ à 1 000 000 $ le mille. On ne semble plus se demander maintenant si l'électrification se fera mais quand elle se fera.

Les chemins de fer électrifiés qui existent actuellement dans le monde transportent 35 % de l'ensemble des tonnes-milles de marchandises [45]. Dans les pays de l'Europe de l'Ouest, environ 90 % des tonnes-milles sont transportées sur des lignes de chemins de fer électrifiées. D'autres pays, comme l'U.R.S.S., l'Afrique du Sud, la Chine, le Japon et l'Inde (qui est en train de passer directement de la vapeur à l'électricité), franchissent actuellement diverses étapes de l'électrification. Formose et la Corée du Sud électrifient leurs lignes principales dès le début.

En Amérique du Nord, il existe des lignes électrifiées dans le corridor nord-est des États-Unis depuis 1907. Au Canada, les lignes électrifiées comprennent une ligne du CN qui passe dans un tunnel sous le Mont-Royal à Montréal, la British Columbia Electric Railway (essentiellement un service voyageurs intra-urbain) et une voie automatisée de sept milles près de Sept-Îles (Québec) [1].

Des plans ont été établis en vue d'électrifier une ligne auxiliaire de la Cartierville Railroad dans le nord du Québec. Le Centre de développement des transports de Transports Canada participera au contrôle de ce projet, qui constitue une démonstration pilote de l'électrification.

Le plus moderne service électrique de transport de marchandises de l'Amérique du Nord est la ligne Black Mesa - Lake Powell en Arizona. Il fait appel à des locomotives électriques de 10 000 hp de General Motors, qui fonctionnent pour un service ferroviaire privé en Arizona.

4.2 Facteurs en faveur de l'électrification

Les avantages de l'électrification découlent surtout de l'exploitation du système une fois qu'il est mis en place. La Federal Railroad Administration des États-Unis a évalué à 1,5 milliard de dollars US les économies annuelles sur le plan de l'exploitation et de la maintenance pour un réseau de 26 000 milles [46].

Ces avantages comprennent notamment les suivants:

a) les coûts de l'énergie sont moins élevés, ce qui représenterait 26 % des économies annuelles;

b) les frais d'entretien sont moins élevés. Les locomotives électriques ont un taux de disponibilité d'environ 92,5 %, comparativement à 90 % pour les locomotives diesel-électriques, et des frais d'entretien qui sont inférieurs d'environ 33 % à ceux des diesels. De plus, une locomotive électrique de 5 100 hp, dont le prix se situe entre 1 200 000 $ et 1 500 000 $, a une durée de vie utile de 30 ans, comparativement à une locomotive diesel de 3 000 hp, qui coûte 1 000 000 $ et dont la durée de vie utile est d'environ 18 ans;

c) la technologie existe actuellement et sa mise en oeuvre n'exige pas de perfectionnements importants;

d) la consommation de carburant diesel serait réduite de 50 %; et

e) les locomotives électriques ont une adhérence élevée et de faibles possibilités de surcharge, ce qui peut réduire le nombre d'unités nécessaires pour faire fonctionner un train sur des pentes ascendantes dans une région montagneuse.

Si l'on considère le coût total de l'électrification, y compris les achats d'équipement stationnaire et de puissance motrice, l'électrification demeure encore concurrentielle avec

les carburants synthétiques. Il est également possible que toute la capacité de production de carburants synthétiques pendant plusieurs années à venir soit utilisée surtout pour le transport routier. L'électrification permettra de choisir la source d'énergie la plus abondante pour fournir la puissance électrique, que ce soit l'électricité, l'énergie nucléaire, le charbon ou le pétrole.

Du point de vue national, on note l'observation suivante dans une étude sur l'électrification des chemins de fer canadiens ("Canadian Railway Electrification Study: Phase I") qui a été réalisée en 1976 [47]:

> "La principale raison qui nous amène à examiner sérieusement l'électrification à ce moment-ci est la possibilité que les approvisionnements de pétrole vont décroître et que les prix du pétrole vont augmenter progressivement au fil des années. Il s'agit là d'un fait fondamental qui découle d'un accroissement régulier de la demande et d'une offre qui est en fin de compte limitée. À long terme, la civilisation industrielle dépend de l'énergie appliquée. En conséquence, la préservation des approvisionnements énergétiques constitue la plus haute priorité pour la politique nationale du Canada." (traduction)

4.3 Arguments contre l'électrification

Dans le passé, la résistance à l'électrification s'est manifestée de l'intérieur des sociétés ferroviaires, surtout en raison des investissements considérables qui étaient exigés et qui, d'après ces compagnies, seraient mieux utilisés dans d'autres secteurs du réseau ferroviaire. Voici quelques-uns des problèmes et des arguments concernant l'électrification:

a) Même si le passage de la vapeur au diesel a complètement éliminé les installations requises pour assurer le service des locomotives à vapeur, la même chose ne se reproduira pas pour le passage du diesel à l'électrique. Il continuera d'exister des unités diesel pour desservir l'industrie, les lignes secondaires, etc., et des installations en double devront être maintenues.

b) Les systèmes de signalisation et de communication qui sont utilisés pour les lignes électrifiées doivent être enfouis ou protégés d'une façon quelconque pour prévenir l'interférence par induction ou le bruit de fond sur le signal.

c) Des travaux de reconstruction devront être entrepris afin d'assurer un dégagement suffisant pour les caténaires, dans les tunnels ou sous les

ponts, là où il n'est pas déjà suffisant. Depuis au moins dix ans, cette exigence a toujours été respectée dans les travaux publics.

d) Les locomotives électriques de la première génération ne possèdent peut-être pas la fiabilité et la standardisation élevées des unités diesel existantes. Il y aura probablement une période de transition avant de pouvoir tirer parti de tous les avantages sur le plan de l'entretien.

e) Du point de vue des sociétés ferroviaires, les capitaux seront des ressources limitées au cours des sept prochaines années. Les capitaux considérables et coûteux qui sont nécessaires pour électrifier les lignes, modifier les systèmes de signalisation et de communication et acheter des locomotives électriques seraient mieux utilisés pour améliorer d'autres composantes du système existant. Les chemins de fer ne sont pas limités par la disponibilité de la puissance motrice mais plutôt par des droits de passage insuffisants, des systèmes de signalisation et de contrôle désuets, et la nécessité d'améliorer les gares de triage [11]. En conséquence, une très faible partie des capitaux nécessaires pour l'électrification proviendra des sociétés ferroviaires elles-mêmes.

f) En Europe, où l'électrification est courante, les compagnies de chemin de fer utilisent des trains rapides et légers, et moins de wagons. En Amérique du Nord, on utilise des trains longs, lourds et lents. Dans le cas des lignes électrifiées, il est beaucoup plus dispendieux d'alimenter un petit nombre de gros trains à l'intérieur du système que de garder en mouvement le même tonnage sous la forme d'un grand nombre de trains plus petits [46]. L'argument qui en découle contre l'utilisation d'un plus grand nombre de trains est le coût élevé de la main-d'oeuvre pour maintenir des équipes supplémentaires.

g) Les services auxiliaires devront être améliorés de manière à pouvoir satisfaire à la demande accrue.

h) L'entretien des caténaires deviendra un coût additionnel pour les chemins de fer.

i) Chaque locomotive diesel-électrique produit l'électricité dont elle a besoin. Lorsqu'il se produit un déraillement, les trains sont passés "en douce" sur les lieux de l'accident. Dans le cas des locomotives électriques, leurs besoins

considérables en puissance viendraient perturber l'alimentation en énergie de la région avoisinante. Le coût de l'énergie varierait également selon l'heure du jour, de sorte que le régulateur demanderait les trains durant les périodes où les tarifs sont moins élevés.

j) L'achat de l'énergie se ferait probablement au niveau provincial. Aucune société ferroviaire ne veut être régie par un parti au pouvoir dont les politiques concernant le chemin de fer pourraient varier.

k) Bien qu'une locomotive électrique à un rendement d'environ 90 % constitue un utilisateur d'énergie plus économique que ne l'est la locomotive diesel à un rendement d'environ 30 %, la source de l'énergie électrique exerce une forte influence sur le rendement énergétique global. Les centrales thermiques ont un rendement d'environ 32 % alors que les centrales hydroélectriques ont un rendement d'environ 85 %. Si toute la puissance électrique consommée par les locomotives provenait de centrales thermiques, le rendement énergétique global de toute la traction électrique serait en fait inférieur à celui du diesel [48].

Il revient aux sociétés ferroviaires elles-mêmes de prendre la décision finale concernant l'électrification des chemins de fer. Leur participation sera essentielle pour assurer la conversion. À mesure que s'élargit l'écart entre le prix du pétrole et celui de l'électricité, les sociétés ferroviaires favoriseront de plus en plus l'électrification [7] mais le problème du financement initial doit être réglé.

4.4 Coût de l'électrification

En 1976, le Canadian Institute of Guided Ground Transport [47] a évalué entre 1,0 milliard et 1,8 milliard de dollars le coût de l'électrification de 9 500 milles de voies ferrées. L'électrification devait comprendre 501 milles de voies du CN entre Edmonton et Kamloops, et 419 milles de voies du CP entre Thunder Bay et Winnipeg. Le programme durerait plus de trente ans et comporterait un investissement annuel de 60 000 000 $.

Une étude sur l'électrification, qui a été effectuée en 1980 par la Federal Railway Administration des États-Unis [46], estime à 14,9 milliards de dollars, soit 570 000 $ le mille, le coût total du capital nécessaire pour électrifier 26 000 milles de voies (voir le tableau 4.1). Chacune des lignes dont on propose l'électrification aux États-Unis transporte plus de 30 millions de tonnes-milles brutes par année.

Tableau 4.1

ESTIMATIONS DE LA FRA CONCERNANT LES INVESTISSEMENTS ET LES ÉCONOMIES ATTRIBUABLES À L'ÉLECTRIFICATION

	$
Milles de voies	26 000
Trafic (en millions de tonnes-milles brutes par année)	945 800
Investissements (en millions de dollars):	
Caténaires	6 040
Gares secondaires	2 620
Signalisation et communications	4 400
Travaux de reconstruction	1 660
Locomotives électriques	5 240
Total des investissements	19 960
Crédits (locomotives diesel)	-5 060
Total des capitaux requis	14 900
Coûts et crédits annuels (en millions de dollars):	
Remplacement des locomotives diesel	-281
Énergie diesel	-1 500
Énergie électrique	1 110
Entretien des locomotives diesel	-1 360
Entretien des locomotives électriques	409
Entretien des caténaires	114
Économies nettes par année	1 510
Aspects financiers:	
Économies cumulatives (29 ans)	43 790
Taux de rendement du capital investi	14 %

Source: [46]

Étant donné que le coût du capital excède 18 %, le taux de rendement de 14 % de l'électrification ne suffirait pas à justifier la conversion sur le plan financier. À l'heure actuelle, il semble que les compagnies de chemins de fer du Canada aient besoin d'un taux de rendement interne de 20 %.

Une autre étude effectuée pour la Burlington Northern évalue à 780 000 000 $, soit environ 1 000 000 $ le mille, le coût de l'électrification de 740 milles de voies pour transporter le charbon [11].

4.5 Résumé

L'importance des investissements requis constitue le principal obstacle à l'électrification. On évalue actuellement à environ 1 000 000 $ le mille les coûts pour les installations fixes et la puissance motrice, et ces coûts ne cessent d'augmenter. La plupart des sociétés ferroviaires sont en faveur de l'électrification, si le problème du financement initial peut être réglé; certaines compagnies estiment cependant que cet argent serait mieux utilisé ailleurs dans le réseau. Il est possible que la rareté des capitaux soit le facteur qui empêche éventuellement l'électrification.

La technologie de l'électrification existe déjà et, de façon générale, sa mise en oeuvre en Amérique du Nord semble être uniquement une question de temps. L'électrification des lignes principales réduira d'environ 50 % la consommation de carburant, diminuera les frais d'entretien et d'énergie, et permettra une plus grande flexibilité pour choisir les sources d'énergie utilisées en vue de fournir la puissance électrique. La grande puissance et l'adhérence forte des locomotives électriques pourraient également réduire le nombre d'unités nécessaires dans les régions montagneuses.

Voici quelques-uns des inconvénients de l'électrification: nécessité d'avoir des installations doubles pour le service des moteurs diesel et électriques; modifications des systèmes de signalisation; certains travaux de reconstruction pour assurer un dégagement suffisant; réduction de la fiabilité des locomotives électriques de la première génération; et exploitation de trains plus courts, avec des coûts de main-d'oeuvre plus élevés.

Chapitre 5

WAGONS À MARCHANDISES

5.1 Introduction

Ce chapitre présente un bref historique de l'évolution des wagons à marchandises depuis 1945 et décrit les progrès les plus récents ainsi que les progrès à court terme dans ce secteur.

Les cinq grands types de wagons à marchandises seront traités, à savoir: les wagons couverts, les wagons-tombereaux, les wagons-trémies, les wagons-citernes et les wagons plats. Il sera également question de l'évolution des types de wagons, de certaines tendances statistiques, des progrès accomplis en Europe, de l'aérodynamique, du matériel roulant, de l'équipement intermodal et des tendances futures.

5.2 Histoire générale de l'évolution des wagons à marchandises

5.2.1 Wagons couverts

Les wagons couverts d'une longueur de 40 ou 50 pieds et d'une capacité de 40 ou 50 tonnes ont été à peu près les seuls modèles qui ont été construits au cours de la période de 40 ans qui s'est terminée vers 1960. De concert avec l'American Railway Car Institute, la division mécanique de la compagnie AAR a préparé des conceptions fortement standardisées qui ont servi de base pour des centaines de milliers de wagons à revêtement simple et double qui ont été construits au cours de ces quatre décennies.

Au cours des années 1920, un wagon de bois couvert d'une longueur de 50 pieds et équipé d'un châssis pesait 65 000 livres et pouvait transporter jusqu'à 80 000 livres. Dans les années 1960, la demande en vue d'une longueur, d'une capacité cubique et d'une capacité de transport plus grandes a donné naissance aux wagons de 60 et 86 ½ pieds, de 70 et 100 tonnes. Ces wagons ont été mis au point à l'origine pour le transport des pièces d'automobiles. D'autres types de capacité élevée ont également été mis au point pour les appareils ménagers [49]. Le wagon couvert qui est illustré à la figure 5.1, est un wagon universel moderne de 50 pieds, d'une capacité de 76 tonnes.

5.2.2 Wagons-tombereaux

Le wagon-tombereau sert surtout à transporter le minerai et le charbon, les produits forestiers, l'acier et la machinerie. Il est d'une construction plus lourde que le wagon couvert et est conçu pour le chargement et le déchargement par le haut de marchandises en vrac et de biens manufacturés qui exigent moins de protection que ce qu'offre le wagon couvert. En 1955, un couvercle facile à enlever a été ajouté afin de protéger le contenu contre les intempéries. À l'heure actuelle, ces wagons-tombereaux couverts sont largement utilisés pour transporter les tôles d'acier en rouleaux ou en paquets. Un wagon-tombereau typique d'une capacité de 100 tonnes est illustré à la figure 5.2.

5.2.3 Wagons-trémies

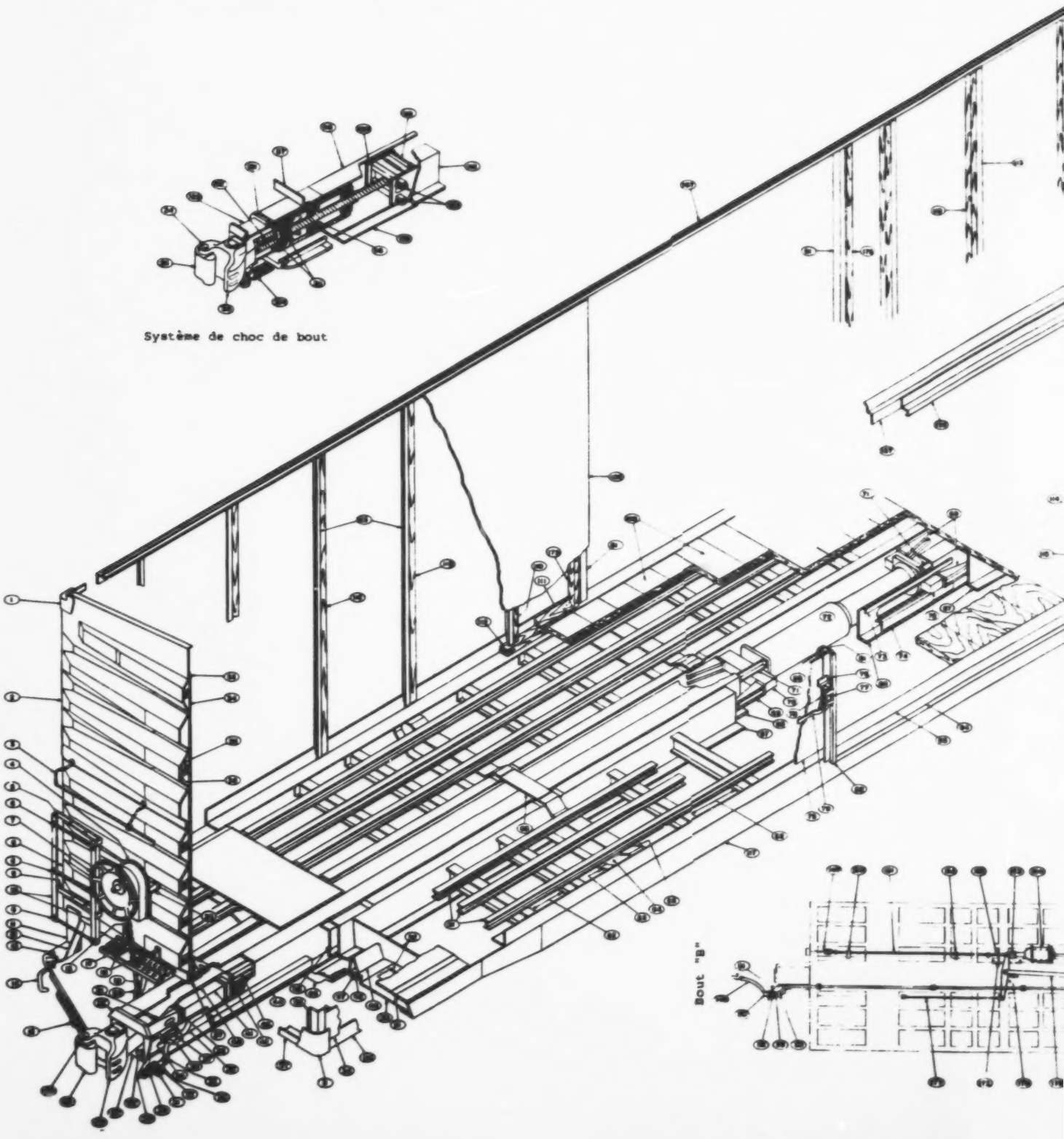
Le wagon-trémie est semblable à un wagon-tombereau, mais il comporte en plus des portes dans le plancher qui permettent de charger des marchandises en vrac. Il a longtemps représenté l'une des plus importantes catégories de wagons. Étant donné le trafic croissant de ressources, le wagon-trémie vient immédiatement après le wagon couvert pour ce qui est du nombre d'unités en service.

Construit à l'origine en grand nombre au cours des années 1920 pour transporter du ciment, le wagon-trémie couvert a servi de plus en plus, depuis 25 ans, à transporter un nombre croissant de produits en vrac qui nécessitent une protection particulière au cours du voyage. Ce wagon permet de transporter en vrac des marchandises qui étaient auparavant expédiées dans des sacs et des barils, ou manipulées en vrac dans des wagons plats équipés de portes à grain. Certains wagons ont été munis d'un dispositif de contrôle de l'humidité pour le transport de produits chimiques et alimentaires. Une innovation récente est l'utilisation de wagons-trémies couverts comportant une installation frigorifique et un revêtement isolant pour le transport en vrac de denrées périssables [49].

La figure 5.3 montre un wagon-trémie couvert typique, équipé d'une trappe de chargement manuelle.

The Railway Educational Bureau,
1809 Capitol Avenue,
Omaha, Nebraska 68102
© Simmons-Boardman Publishing Corporation MCMLXX

Système de choc de bout



reau,

ration MCMLXX

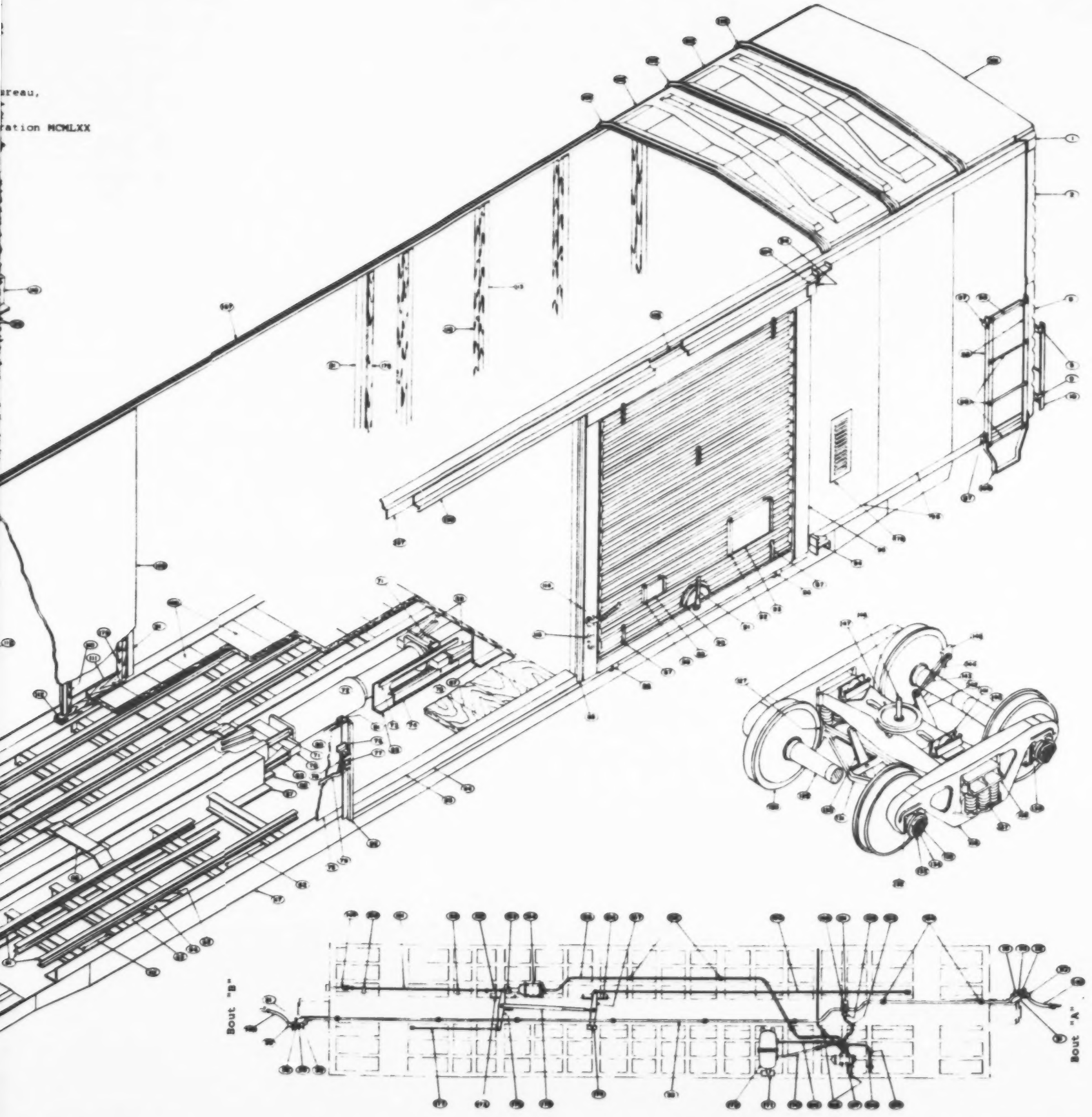
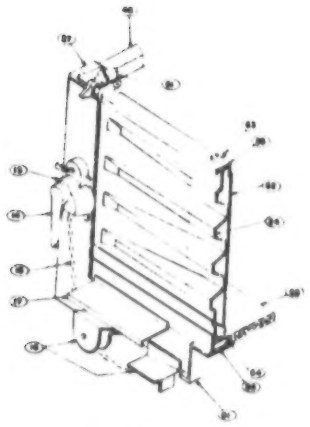


Figure 5.1

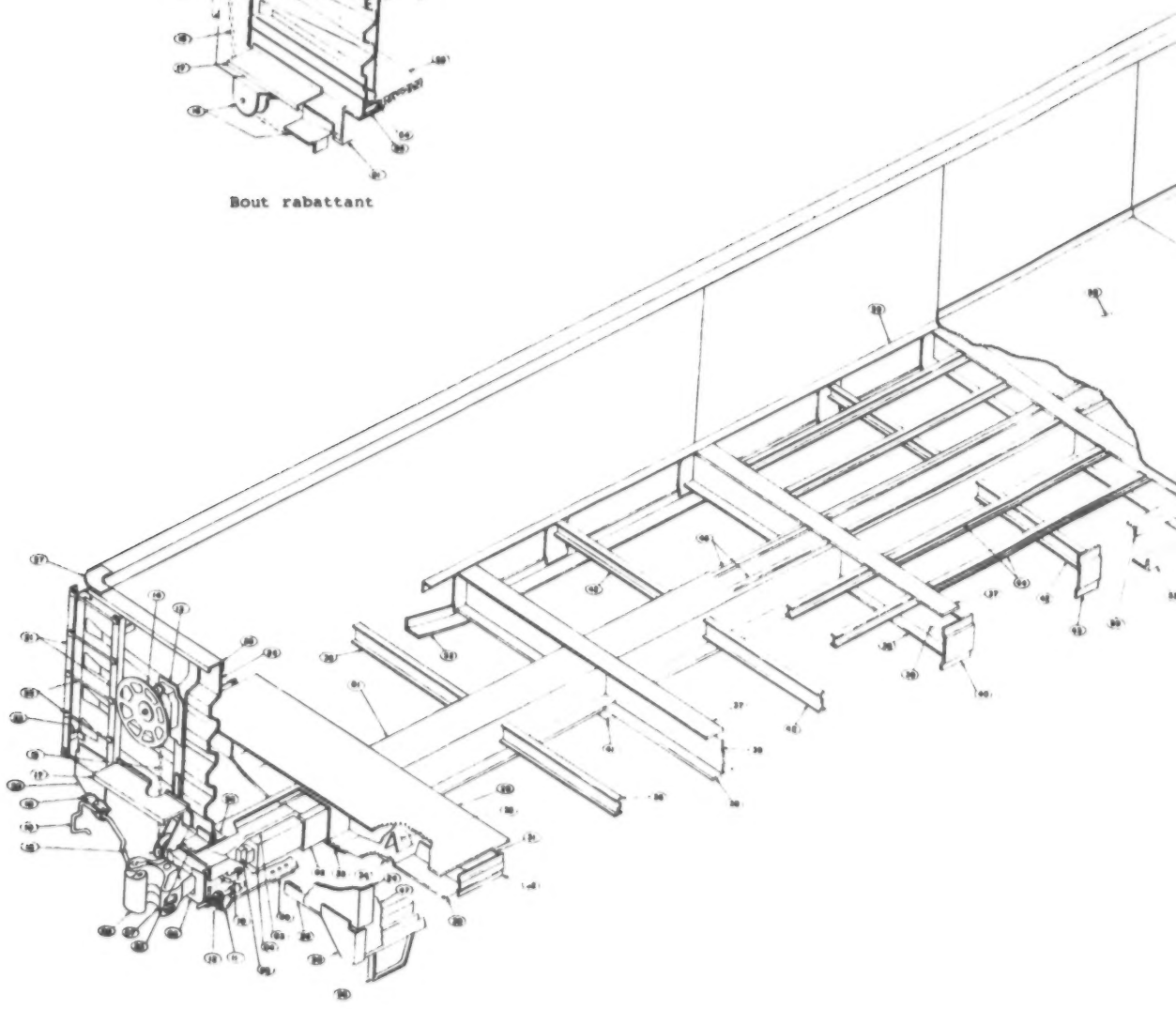
PLAN DE WAGON COUVERT

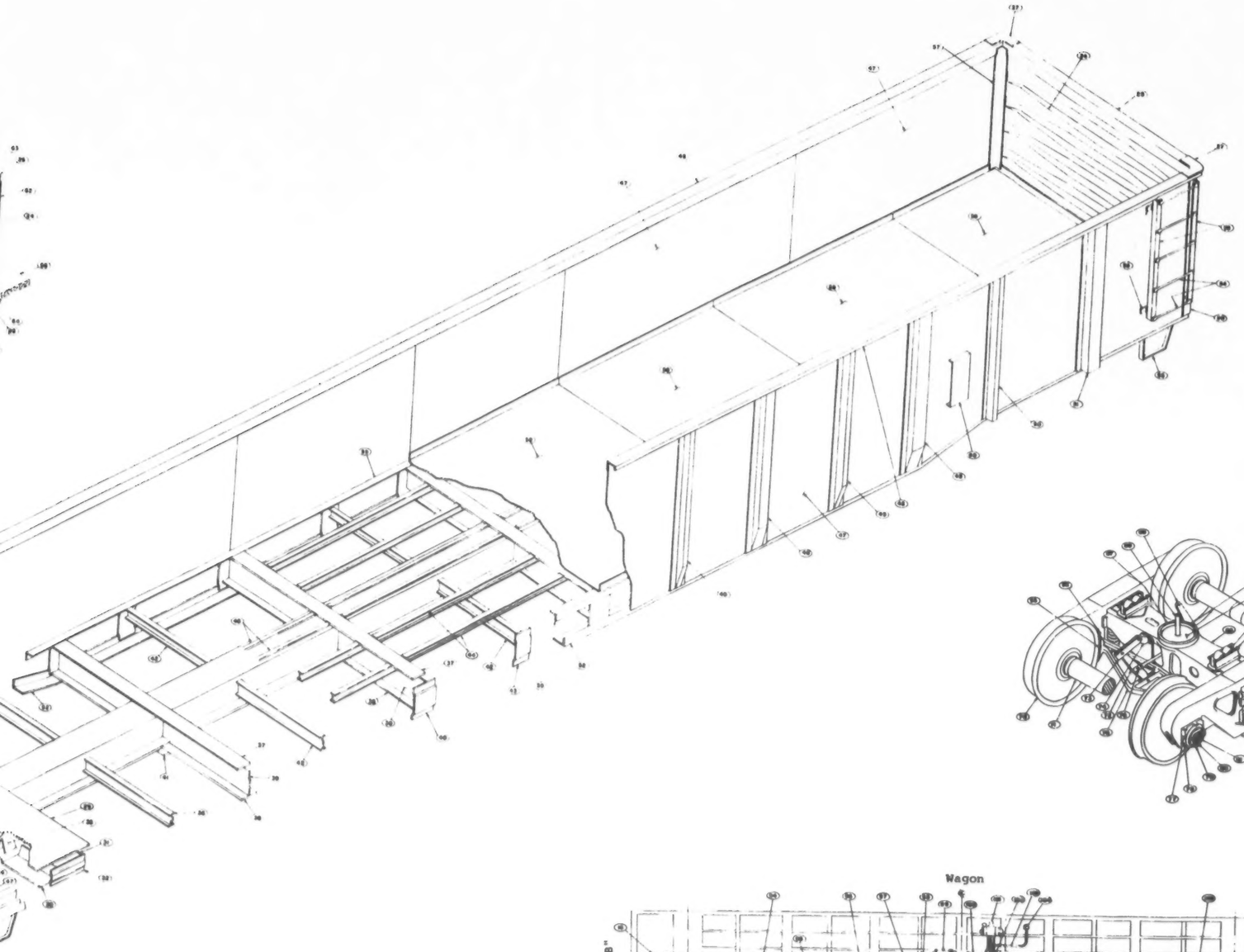
Revêtement en acier -- Attelage souple
Longueur 50' 6" Capacité 154 000 livres

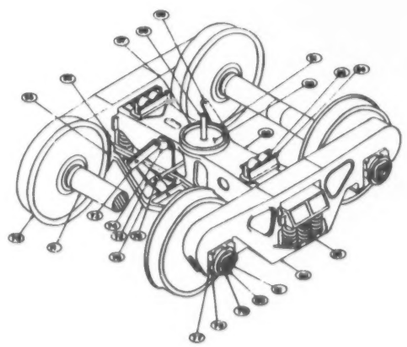
1- Chapeau d'angle
2- Tôle supérieure de bout
3- Main courante de bout
4- Carter du frein à main
5- Support supérieur d'échelle de bout
6- Barreau d'échelle de bout
7- Volant du frein à main
8- Tôle inférieure de bout
9- Support inférieur d'échelle de bout
10- Montant d'échelle de bot
11- Console du levier de dételage
12- Support de console de levier de dételage
13- Étrier du levier de dételage
14- Levier téléscopique de dételage
15- Guide du levier de dételage
16- Chaîne du frein à main
17- Marchepied de bout
18- Support de marchepied
19- Levier coudé
20- Tirant vertical du frein à main
21- Appui avant de l'appareil de traction
22- Plaque de choc
23- Console du carter du frein à main
24- Axe d'attelage
25- Mâchoire d'attelage
26- Tête d'attelage de type "E"
27- Berceau d'attelage
28- Plaque d'usure du berceau d'attelage
29- Bride de la plaque de choc
30- Robinet d'arrêt
31- Support du robinet d'arrêt
32- Étrier du robinet d'arrêt
33- Raccord
34- Rondelle de la clavette de l'appareil de traction
35- Coude 45°
36- Clavette de l'appareil de traction
37- Goupille de la clavette de l'appareil de traction
38- Conduite générale, 1 1/4" (frein)
39- Bloc d'appui
40- Étrier d'attelage
41- Appareil de traction
42- Appui arrière de l'appareil de traction
43- Renfort de l'appui arrière de l'appareil de traction
44- Guide de la longrine coulissante (bout)
45- Guide de la longrine coulissante (traverse)
46- Pivot de caisse
47- Glissoir de caisse
48- Cale du glissoir de caisse
49- Raidisseur du glissoir de caisse
50- Plaque de recouvrement inférieure (traverse)
51- Plaque de recouvrement supérieure (traverse)
52- Âme de traverse
53- Fixe-revêtement de bout
54- Revêtement intérieur de bout
56- Blocage du fond de clouage de bout
57- Traverse extrême
58- Montant d'angle
59- Paroi latérale de bout
60- Brancard
61- Longrine de plancher
62- Traverse intermédiaire
63- Plaque de recouvrement inférieure (traverse intermédiaire)
64- Âme de traverse intermédiaire
65- Plaque de recouvrement supérieure (traverse intermédiaire)
66- Selle de traverse intermédiaire
67- Longrine centrale (fixe)
68- Longrine centrale (coulissante)
69- Goujon d'ancrage de la longrine centrale (coulissante)
70- Clavette de choc
71- Goujon d'ancrage de la longrine centrale (fixe)
72- Système de choc
73- Renfort supérieur - ouverture de la longrine centrale
74- Renfort inférieur - ouverture de la longrine centrale
75- Tôle de face (adjacent à la porte)
76- Support de loquet de porte
77- Goupille de verrouillage
78- Came de blocage
79- Levier de manoeuvre
80- Renfort du montant de porte
81- Montant de porte
82- Butée (de porte) avant
83- Seuil
84- Rail de porte
85- Bord avant de la porte
86- Patte de sécurité
87- Poignée de porte
88- Support de porte-étiquettes d'acheminement
89- Porte-étiquettes d'acheminement
90- Guide du levier de levage
91- Levier de levage
92- Support de porte-étiquettes
93- Porte-étiquettes
94- Butée (de porte) arrière
95- Bord arrière (porte)
96- Tôle intermédiaire de face
97- Support d'échelle latérale
98- Montant d'échelle latérale
99- Barreau d'échelle latérale
100- Marchepied en étrier
101- Tôle supérieur de toit
102- Tôle intermédiaire de toit
103- Couvre-joint (toit)
104- Plaque de sécurité
105- Traverse supérieure de porte
106- Traverse de retenue (haut de porte)
107- Longrine de rive (toiture)
108- Revêtement intérieur (paroi latérale)
109- Lame de plancher
110- Baguette de clouage (montant)
111- Baguette de retenue du grain
112- Cale intérieure de plancher
113- Montant de face
114- Fixation de loquet de porte
115- Loquet de porte
116- Piston
117- Renfort de brancard
118- Longrine centrale
119- Plaque d'appui arrière
120- Pylône du goujon d'ancrage arrière
121- Pylône de choc moulé
122- Clavette d'attelage
123- Système de choc
124- Mécanisme de rappel
125- Plaque de visite
126- Clavette arrière
127- Sabot de frein
128- Roue
129- Essieu
130- Balancier d'essieu
131- Triangle de frein
132- Adapteur du roulement à rouleaux
133- Plaque de blocage (roulement à rouleaux)
134- Boulon de blocage
135- Frein de vis de blocage
136- Balancier équilibreur (bogie)
137- Ressort de bogie
138- Traverse danseuse
139- Boîte à rouleaux
140- Rouleaux de balancier équilibreur
141- Carcasse de palier (balancier équilibreur)
142- Balancier de renvoi
143- Manille du balancier de renvoi
144- Manille du balancier à point fixe
145- Support du balancier de renvoi (sur châssis)
146- Cheville ouvrière
147- Crapaudine coulée dans la traverse danseuse
148- Tuyau d'air
149- Chaîne du frein à main au levier coudé
150- Guide de tige du frein à main
151- Tige du frein à main
152- Chaîne du frein au cylindre
153- Tige du piston
154- Cylindre de frein d'air
155- Conduite de cylindre, 3/4"
156- Guide du balancier à point fixe
157- Balancier à point fixe
158- Collier de retenue, 3/4"
159- Connecteur de la timonerie (bout "A")
160- Té de la conduite dérivée
161- Support du té de la conduite dérivée
162- Attrape-poussière et robinet d'isolement
163- Tuyau de raccordement
164- Collier de retenue, 1 1/2"
165- Conduite de retenue
166- Valve de retenue
167- Distributeur ABD
168- Tringle de rappel
169- Conduite du réservoir auxiliaire, 3/4"
170- Conduite du réservoir d'urgence, 3/4"
171- Support du réservoir
172- Réservoir auxiliaire et d'urgence combiné
173- Guide du balancier du cylindre
174- Balancier à point fixe (frein)
175- Régleur de timonerie (frein)
176- Balancier du cylindre
177- Connecteur de la timonerie, bout "B"
178- Panneau ACI
179- Baguette de clouage (montant de porte)



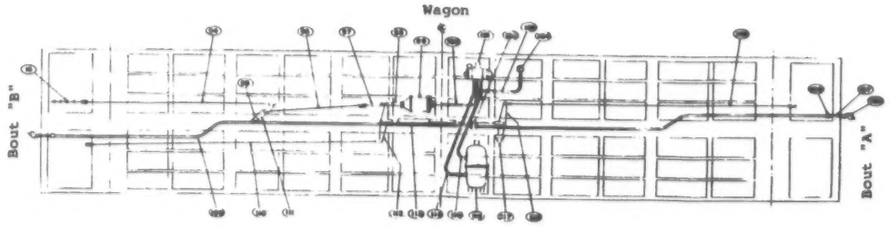
Bout rabattant







Wagon



The Railway Educational Bureau
1809 Capital Avenue
Omaha, Nebraska 68102

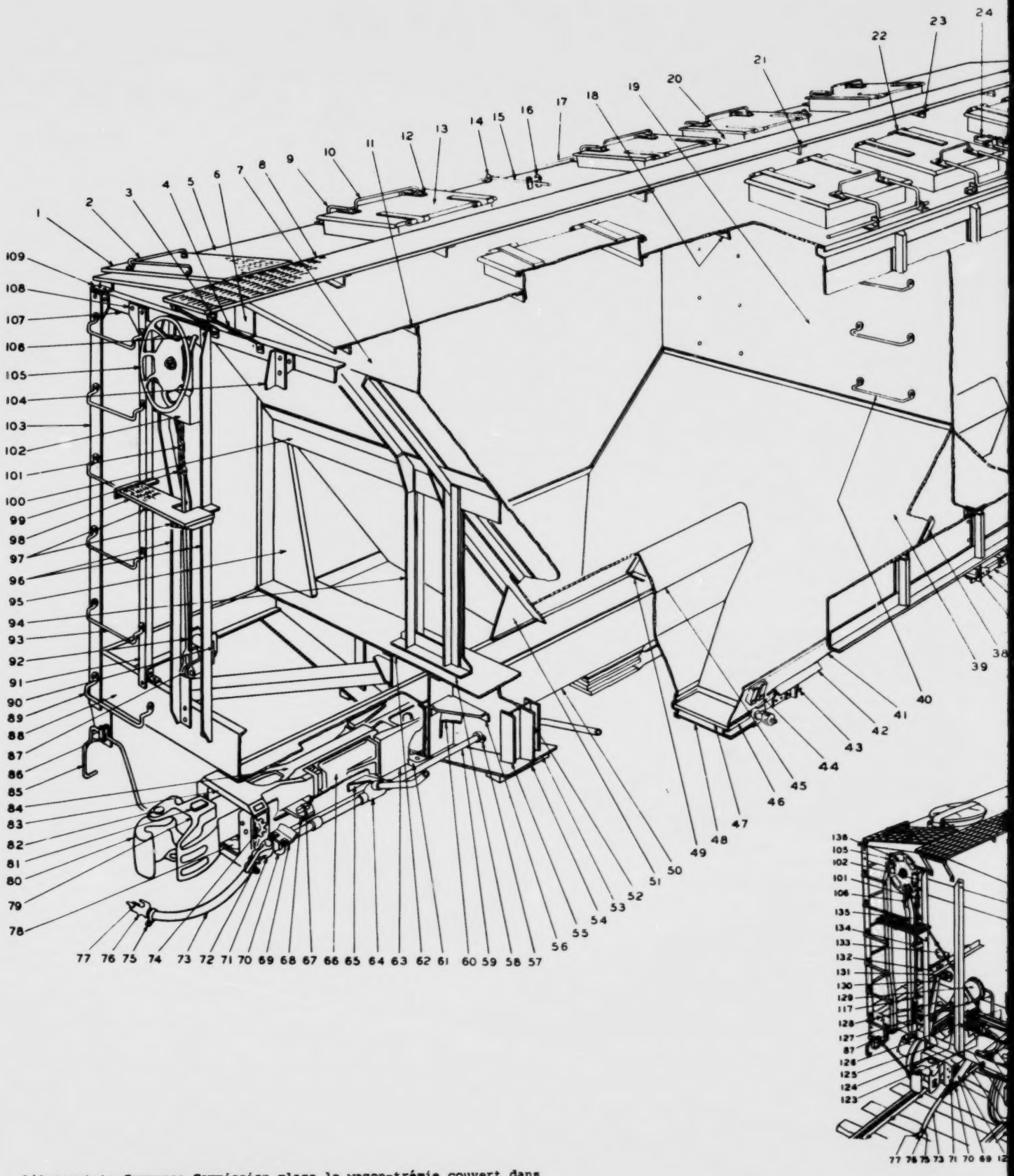
Copyright MCMLXXIV, Simmons-Boardman Publishing Corp.,
The Railway Educational Bureau

Figure 5.2

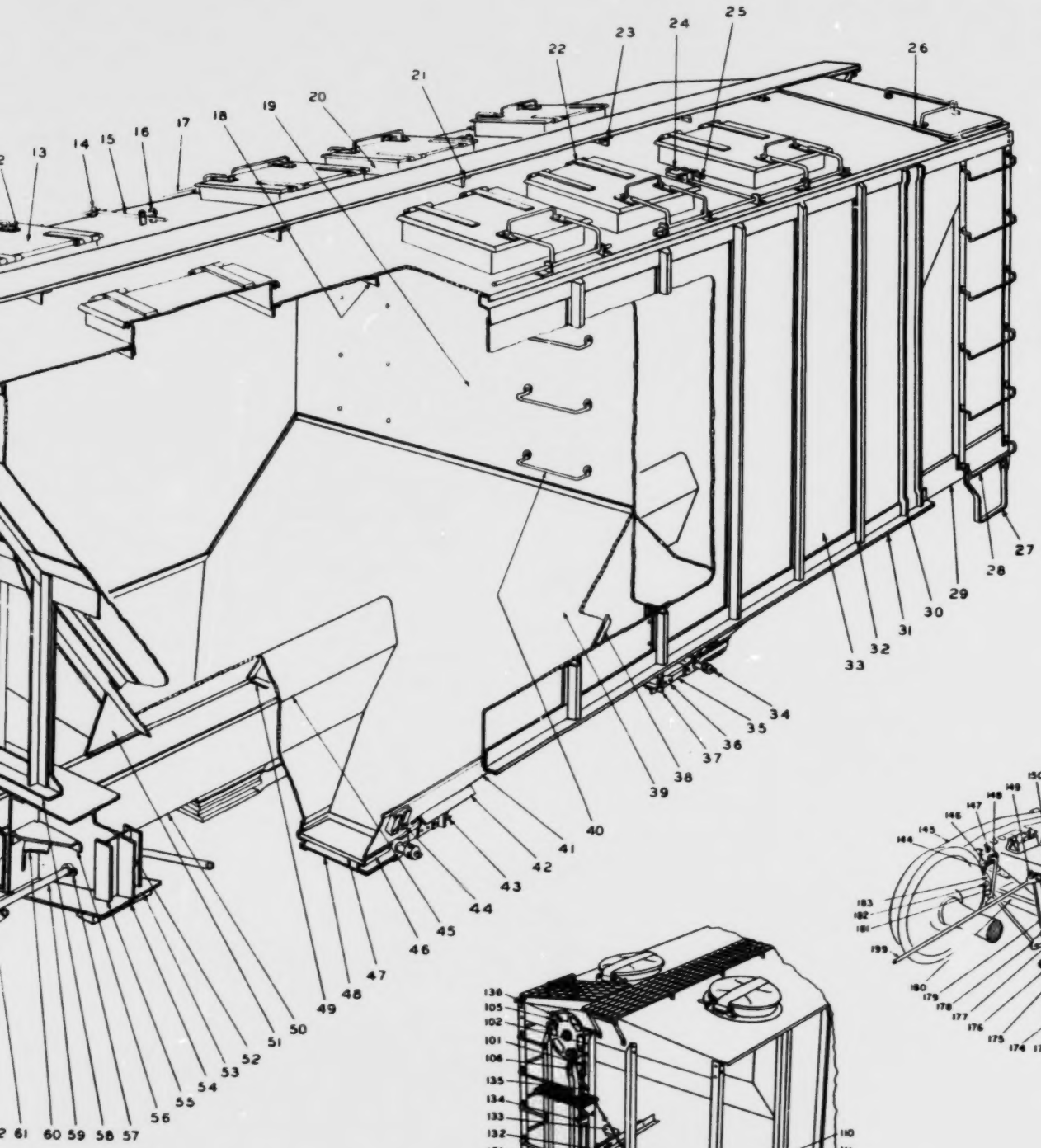
PLAN DE WAGON-TOMBEREAU

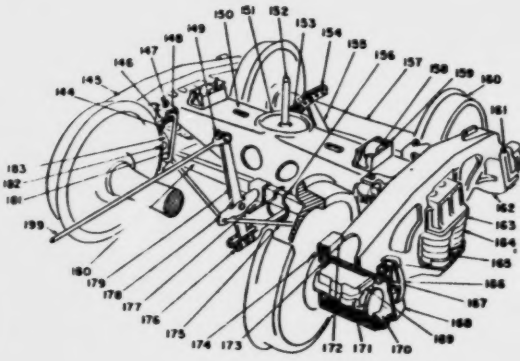
Capacité de 100 tonnes

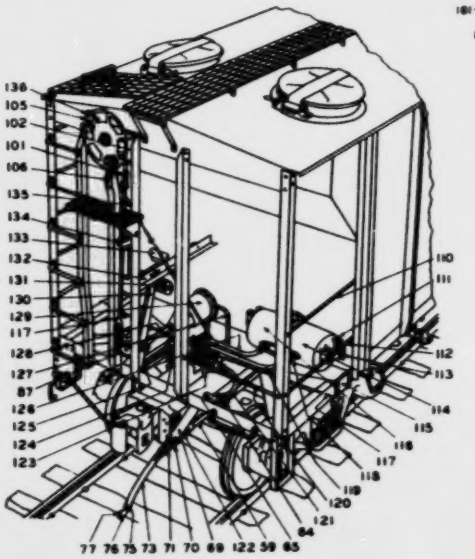
1- Longrine centrale
2- Pivot de caisse et appui arrière de l'appareil de traction (combiné)
3- Étrier d'attelage
4- Appareil de traction
5- Plaque d'appui de l'appareil de choc
6- Pylône de choc moulé et appui avant de l'appareil de traction (combiné)
7- Tête d'attelage
9- Berceau de l'appareil de traction
10- Clavette de l'appareil de traction
11- Support du robinet d'arrêt
12- Étrier du robinet d'arrêt
13- Carter de l'engrenage du frein à main
14- Volant ou guide du frein à main
15- Chaîne du frein à main
16- Poulie et support du frein à main
17- Marchepied du frein
18- Support de la tige de dételage
19- Tige de dételage
20- Bande d'angle inférieure
21- Montants d'échelle de bout
22- Barreaux d'échelle de bout
23- Support des montants d'échelle de bout
24- Tôle de bout
25- Plaque de bout supérieure
26- Traverse extrême
27- Chapeau de coin supérieur
28- Raccord de la traverse extrême et de la longrine centrale
29- Plaque de recouvrement supérieure (traverse)
30- Plaque de recouvrement inférieure (traverse)
31- Âme de traverse
32- Raccord de la traverse et de la face
33- Semelle de traverse
34- Glissoir de caisse
35- Raidisseur du glissoir de caisse
36- Traverse intermédiaire (à la roue)
37- Plaque de recouvrement supérieure (traverse intermédiaire)
38- Plaque de recouvrement inférieure (traverse intermédiaire)
39- Âme de traverse intermédiaire
40- Raccord de la traverse intermédiaire et de la face
41- Selle de traverse intermédiaire
42- Traverse intermédiaire
43- Raccord de la traverse intermédiaire et de la face
44- Longrine de plancher
45- Fourrure de longrine centrale
46- Longrine de rive
47- Tôle de face
48- Montant de face (à la traverse intermédiaire)
49- Montant intermédiaire latéral
50- Montant de face (à la traverse intermédiaire de roue)
51- Montant de face (à la traverse)
52- Brancard
53- Montant d'échelle latérale
54- Barreaux d'échelle latérale
55- Supports des barreaux d'échelle latérale
56- Marchepied en étrier
57- Montant d'angle intérieur
58- Tôle de plancher
59- Cornière-support de plancher
60- Support du panneau ACI
61- Mécanisme de blocage du rabattant
62- Tôle de bout (intérieur)
63- Boucle de levage
64- Angle de fermeture du plancher
70- Roue
71- Essieu
72- Balancier de renvoi
73- Balancier à point fixe
74- Support du balancier à point fixe
75- Triangle de frein
76- Balancier d'essieu
77- Adapteur du roulement à rouleaux
78- Boîte à rouleaux
79- Plaque de blocage
80- Boulon de blocage
81- Frein de vis de blocage
82- Balancier équilibreur
83- Ressort de bogie
84- Rouleaux de balancier équilibreur
85- Galet du glissoir
86- Traverse danseuse
87- Crapaudine coulée dans la traverse danseuse
88- Balancier d'essieu
89- Cheville ouvrière
90- Plaque d'usure horizontale
91- Plaque d'usure verticale
92- Clavette du sabot de frein
93- Sabot de frein
94- Tige du frein à main
95- Levier du cric
96- Tirant de frein
97- Chaîne de frein à main (au cylindre)
98- Tige du piston
99- Cylindre de frein
100- Conduite du cylindre de frein (3/4")
101- Distributeur "ABD"
102- Té de la conduite dérivée
103- Conduite de la valve de retenue (3/8")
104- Valve de retenue
105- Connecteur de la timonerie (bout "A")
106- Raccord de conduite de frein
107- Raccord de conduite générale
108- Robinet d'arrêt (1 1/4")
110- Connecteur de la timonerie (bout "B")
111- Levier de cric
112- Balancier du cylindre
113- Régleur de timonerie (frein)
114- Conduite du réservoir auxiliaire (3/4")
115- Conduite du réservoir d'urgence (3/4")
116- Réservoir auxiliaire et d'urgence combiné
117- Guide du balancier à point fixe
118- Balancier à point fixe



L'Interstate Commerce Commission place le wagon-trémie couvert dans la catégorie des wagons couverts. Les normes réglementaires de sécurité pour ce wagon doivent se conformer aux normes de sécurité de l'Interstate Commerce Commission pour les wagons couverts.







The Railway Educational Bureau,
1809 Capitol Avenue,
Omaha, Nebraska 68102

Copyright, 1956, par D.C. Buell

e couvert dans
ntaires de
s de sécurité
couverts.

Figure 5.3

PLAN DE WAGON-TRÉMIE COUVERT

1- Passerelle de toit transversale
2- Poignée de toit
3- Support de bout (passerelle de toit)
4- Support de passerelle de toit
5- Tôle de toit
6- Raccord du toit et de la plaque de bout
7- Tôle de bout
8- Passerelle de toit longitudinale
9- Doigt du levier de blocage
10- Poignée du couvercle de trappe
11- Raccord du toit et de la tôle de bout
12- Plaque d'usure du levier de blocage
13- Couvercle de trappe
14- Support du levier de blocage
15- Poignée du levier de blocage
16- Dispositif de fermeture du levier de blocage
17- Tige du levier de blocage
18- Courbe de toit
19- Cloison centrale
20- Cadre du couvercle
21- Berceau intermédiaire (passerelle de toit)
22- Pentures du couvercle de trappe
23- Berceau de joint (passerelle de toit)
24- Chaîne de la goupille de fixation
25- Goupille de fixation
26- Support de la passerelle de toit transversale
27- Marchepied en étrier
28- Barreau d'échelle latérale
29- Faux brancard
30- Montant de traverse
31- Cornière de brancard
32- Montant intermédiaire latéral
33- Tôle de face
34- Arbre de manoeuvre de porte coulissante
35- Glissière de porte
36- Raccord de la glissière et du support de porte
37- Support de la glissière de porte
38- Raccord de la plaque de fond et de la tôle de fond
39- Plaque de fond inclinée
40- Barreau de l'échelle intérieure
41- Plaque de fond latérale
42- Raidisseur de la plaque de fond
43- Arrêt de porte coulissante
44- Support de vibrateur
45- Capot de la longrine centrale
46- Cadre de l'orifice de déchargement
47- Porte coulissante
48- Plaque d'étanchéité de fond
49- Renfort de capot (longrine centrale)
50- Longrine centrale
51- Gousset entre la plaque de fond et la longrine centrale
52- Diaphragme de la traverse pivot
53- Plaque de recouvrement inférieure de la traverse pivot
54- Glissoir de caisse
55- Jambe de force (glissoir)
56- Support de l'entretoise diagonale
57- Collier de retenue
58- Console entre la traverse et le support de la plaque de fond
59- Conduite générale
60- Entretoise diagonale
61- Pivot de caisse
62- Plaque de recouvrement supérieure de la traverse pivot
63- Appui arrière de l'appareil de traction coulé dans la bourrure du pivot de caisse
64- Té de la conduite dérivée
65- Support du té de la conduite dérivée
66- Appareil de traction
67- Goupille de la clavette de traction
68- Clavette de l'appareil de traction
69- Support du robinet d'arrêt
70- Étrier du robinet d'arrêt
71- Robinet d'arrêt
72- Raccord du boyau du frein à air
73- Boyau du frein à air
74- Dispositif de réglage de la hauteur de l'axe d'attelage
75- Collier du boyau du frein à air
76- Tête d'accouplement du boyau du frein à air
77- Garniture d'accouplement du boyau du frein à air
78- Dispositif de centrage de l'attelage
79- Tête d'attelage
80- Mâchoire d'attelage
81- Bouchon de l'orifice de la tête d'attelage
82- Axe d'attelage
83- Pylône de choc moulé et appui avant de l'appareil de traction (combiné)
84- Étrier d'attelage
85- Levier de dételage
86- Console du levier de dételage
87- Levier coudé du frein à main
88- Traverse extrême
89- Poignée de bout
90- Support du levier coudé du frein à main
91- Montant d'échelle de bout
92- Tirant vertical du frein à main
93- Barreau d'échelle de bout
94- Support de la plaque de fond
95- Gousset entre traverse et montant de traverse
96- Console du carter de l'engrenage du frein à main
97- Support du marchepied du frein
98- Marchepied du frein
99- Manille de la chaîne du frein à main
100- Raidisseur de plaque de fond
101- Chaîne du frein à main
102- Carter de l'engrenage du frein à main
103- Montant d'angle
104- Montant de bout
105- Volant du frein à main
106- Levier de commande à cliquet du frein à main
107- Plaque de bout
108- Raccord de l'angle vertical et de la plaque de bout
109- Support supérieur de coin
110- Main courante supérieure
111- Boulon de montage du réservoir du frein à air
112- Main courante inférieure
113- Support du réservoir auxiliaire
114- Réservoir auxiliaire
115- Porte-étiquettes d'acheminement
116- Réservoir d'urgence
117- Tringle de rappel du réservoir
118- Raccord de conduite
119- Conduite du réservoir auxiliaire
120- Poignée de bout supérieure
121- Conduite dérivée
122- Raccord de conduite générale
123- Attrape-poussière et robinet d'isolement (combiné)
124- Valve "AB"
125- Guide du balancier du cylindre
126- Conduite du réservoir d'urgence
127- Conduite du cylindre de frein
128- Tige du piston
129- Cylindre de frein
130- Balancier du cylindre
131- Plaque de vérification de la timonerie
132- Support du balancier du cylindre
133- Porte-étiquettes de réforme
134- Guide supérieur du tirant de frein
135- Conduite de retenue
136- Valve de retenue
144- Clavette du sabot de frein
145- Balancier équilibreur
146- Plaque d'usure de la bielle de suspension
147- Goupille de bielle de suspension
148- Support de bielle de suspension du sabot coulé dans le balancier équilibreur
149- Cheville et goupille fendue
150- Traverse danseuse
151- Crapaudine coulée dans la traverse danseuse
152- Cheville ouvrière
153- Support du guide du balancier de renvoi
154- Guide du balancier de renvoi
155- Balancier de renvoi
156- Étrier de sécurité du connecteur des balanciers d'essieux
157- Essieu
158- Rouleau du glissoir
159- Glissoir et guide du rouleau
160- Roue
161- Axe du couvercle de boîte d'essieu
162- Boîte d'essieu coulée dans le balancier équilibreur
163- Siège de ressort supérieur
164- Ressort de bogie
165- Siège de ressort inférieur
166- Capot du couvercle de boîte d'essieu
167- Ressort du couvercle de boîte d'essieu
168- Couvercle de boîte d'essieu
169- Coin de serrage de la boîte d'essieu
170- Bourrage de boîte d'essieu
171- Coussinet de boîte d'essieu
172- Couvercle d'obturateur de boîte d'essieu
173- Obturateur de boîte d'essieu
174- Dispositif de blocage de l'obturateur
175- Tendeur du triangle de frein
176- Connecteur des balanciers d'essieux
177- Étrier de sécurité du triangle de frein
178- Jambe de force du triangle de frein
179- Balancier d'essieu vertical
180- Entretoise de compression du triangle de frein
181- Bielle de suspension du triangle de frein
182- Sabot de frein
183- Porte-semelle de frein
199- Bielle de commande générale de la timonerie du bogie

5.2.4 Wagons-citernes

Le wagon-citerne a été mis au point il y a plus d'un siècle pour transporter le pétrole brut et les produits pétroliers. Il est aujourd'hui surtout utilisé pour desservir les industries chimique et agricole.

Ce wagon est passé d'une capacité de 43,7 tonnes en 1945 à une capacité de 100 tonnes, comme celui qu'on retrouve à la figure 5.4. Les autres augmentations seront minimales, car la charge par essieu a presque atteint le maximum de 65 000 livres. Une charge supérieure causerait une usure excessive des rails, étant donné la taille actuelle des roues des wagons.

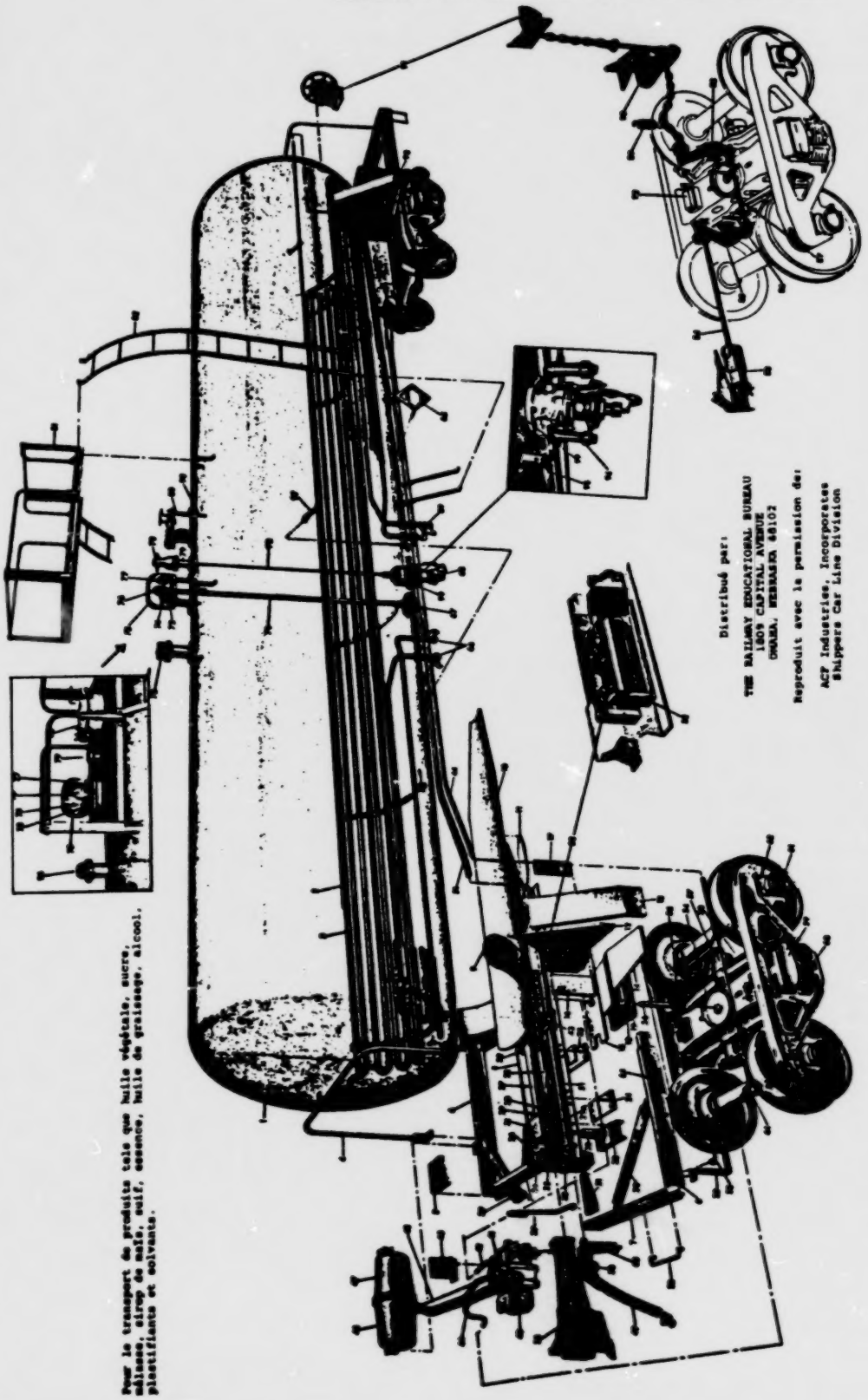
La longueur des wagons-citernes ne varie pas de façon significative car elle est déterminée par l'emplacement des installations de chargement aux raffineries et aux points de destination.

La figure 5.5 montre le nombre de wagons-citernes utilisés par les compagnies de chemin de fer canadiennes de 1945 à 1978. La baisse de 1952 est attribuable à l'introduction des pipe-lines, qui ont accaparé une partie du transport des liquides en vrac.

La diminution constante depuis 1974 est attribuable à plusieurs facteurs. Les nouveaux wagons-citernes ont des capacités supérieures, ce qui réduit le nombre de wagons nécessaires. L'utilisation croissante des pipe-lines continue de réduire la demande de wagons-citernes.

Figure 5.4

WAGON-CITERNE TOUS USAGES DOT 111A 100W-1 AVEC
SERPENTINS DE RÉCHAUFFAGE ET SANS REVÊTEMENT ISOLANT



Pour le transport de produits tels que huile végétale, sucre, mélasse, sirop de maïs, suif, essence, huile de graissage, alcool, plastifiants et solvants.

Distribué par:
THE RAILWAY EDUCATIONAL BUREAU
1809 CAPITAL AVENUE
OMAHA, NEBRASKA 68102

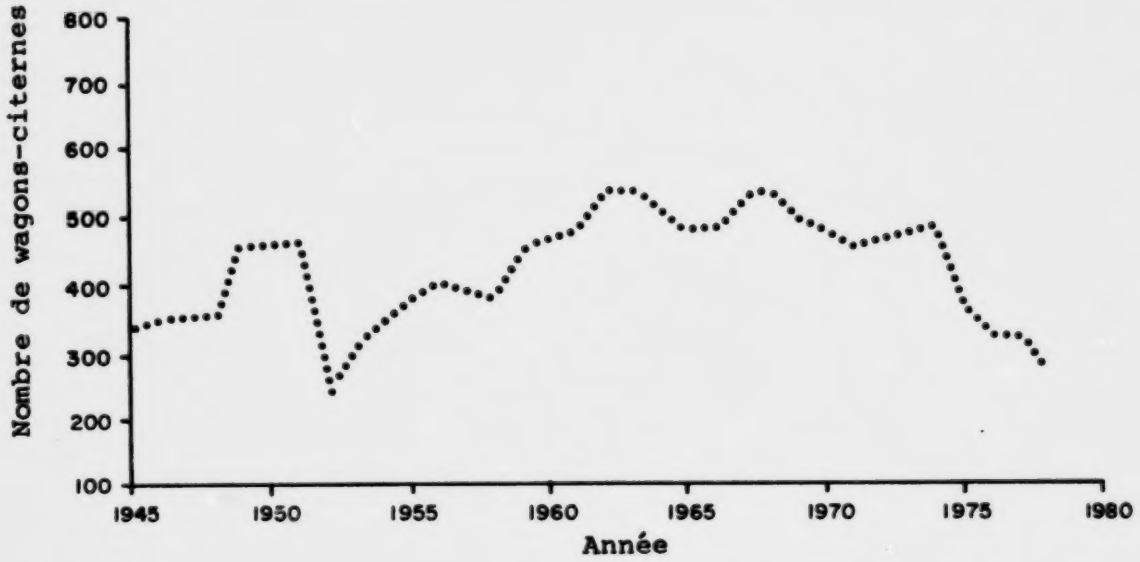
Reproduit avec la permission de:
ACF Industries, Incorporated
Shippers Car Line Division

LISTE DES PIÈCES

1- Citerne
2- Longeron latéral de sécurité
3- Serpentins de réchauffage intérieurs
4- Longeron de bout de sécurité
5- Garde-feu de la plate-forme de bout
6- Brancard
7- Traverse extrême
8- Tronçon de longrine
9- Berceau de citerne
10- Coussin de berceau
11- Renforcement du coussin de berceau
12- Âme de traverse
13- Recouvrement de bout de traverse
14- Recouvrement inférieur de traverse
15- Recouvrement inférieur de longrine
16- Jambe de force avant
17- Jambe de force arrière
18- Pivot de caisse
19- Glissoir de caisse
20- Jambe de force du brancard et de la traverse extrême
21- Gousset de la traverse extrême
22- Marchepied en étrier
23- Poignée de fer
24- Plaque de choc
25- Bride de la plaque de choc
26- Renfort de la plaque de choc
27- Étrier d'attelage
28- Appareil de traction
29- Butée avant de l'appareil de traction
29A- Renfort de la butée avant de l'appareil de traction
30- Bloc d'appui avant
31- Plaque d'usure supérieure de l'axe d'attelage
32- Axe d'attelage
33- Axe de l'étrier d'attelage
34- Courroie de sécurité
35- Carter de l'appareil de traction
36- Attelage - type "F"
37- Tige de dételage
38- Barreau d'attelage
39- Support de la tige de dételage
40- Valve AB
41- Attrape-poussière et robinet d'isolement (combiné)
42- Conduite dérivée
43- Té de la conduite dérivée
44- Conduite du cylindre de frein
45- Valve de retenue (la conduite vers la valve AB n'est pas visible)
46- Réservoir auxiliaire
47- Réservoir d'urgence
48- Triangle de rappel
49- Boyau d'accouplement de la conduite générale
50- Robinet d'arrêt
51- Conduite générale
52- Butée arrière de l'appareil de traction
53- Fourrure centrale
54- Roulement central du bogie
55- Roulement latéral du bogie (voir roulement latéral de friction au n° 92)
56- Cheville couvrière
57- Frein du bogie
58- Triangle de frein
59- Traverse d'ensemble
60- Groupe de ressorts du bogie
61- Roulement à rouleaux
62- Adapteur du roulement à rouleaux
63- Porte-étiquettes de bout
64- Porte-étiquettes d'achèvement
65- Porte-étiquettes latéral
66- Sortie de la vapeur
67- Cuvette d'égouttage
68- Soupape d'échappement du fond
69- Arrivée de la vapeur
70- Tige de la soupape d'échappement du fond
71- Tuyau d'échappement
72- Soupape de sûreté
73- Soupape à pointeau de 1/4" pour la dépression
74- Soupape de sûreté fonctionnant par la dépression
75- Boîtier
76- Soupape à flotteur de 2"
77- Soupape à flotteur de 1"
78- Clé de la soupape d'échappement du fond
79- Tige de la soupape d'échappement du fond
80- Robinet manuel
81- Plate-forme de manoeuvre
82- Échelle latérale
83- Manille de la tige du frein à main
84- Tige du frein à main
85- Levier du frein
86- Courroie de sûreté du ressort du fond
87- Ressort du fond
88- Levier du frein à main
89- Ressort de détente du frein à main
90- Levier coudé
91- Frein à main
92- Roulement latéral de friction
93- Jauge de sortie
94- Soupape d'échappement du fond à flotteur (chemise de vapeur)
95- Poignée de manoeuvre
96- Évent de sûreté (non pour les liquides inflammables - voir n° 73)
97- Support du longeron latéral
98- Support de bout du longeron latéral
99- Bride universelle

Figure 5.5

WAGONS-CITERNES APPARTENANT AUX COMPAGNIES DE CHEMIN DE FER OU LOUÉS PAR CELLES-CI



Source: [51]

5.2.5 Wagons plats

Comme son nom l'indique, le wagon plat était à l'origine une plate-forme de bois montée sur un châssis d'acier équipé de deux bogies. Il servait surtout à transporter des marchandises de format irrégulier qui entraient difficilement dans des wagons fermés ou semi-fermés.

La longueur des wagons plats est passée rapidement de 52 ½ pieds à leur longueur actuelle de 90 pieds, ce qui leur permet de transporter deux conteneurs de 40 pieds.

On s'est beaucoup intéressé à la capacité de nombreux types de wagons introduits depuis quelques années à transporter des marchandises d'un format élevé ou irrégulier; cependant, cette capacité caractérise depuis longtemps bon nombre des wagons plats spéciaux. Depuis quelque temps, certains wagons plats équipés d'un système d'entraînement spécial peuvent transporter jusqu'à 300 tonnes. On trouve également des wagons plats surbaissés, qui peuvent recevoir des charges très hautes, ainsi que des caisses démontables qui simplifient le chargement ou le déchargement de machines énormes.

La plupart des wagons plats servent maintenant au transport intermodal. Le transport de conteneurs/remorques sur wagon plat est abordé plus en détail à la partie 5.3.

La figure 5.6 montre le plan d'un wagon plat typique d'une longueur de 90 pieds et d'une capacité de 65 tonnes pour le transport de conteneurs/remorques sur wagon plat.

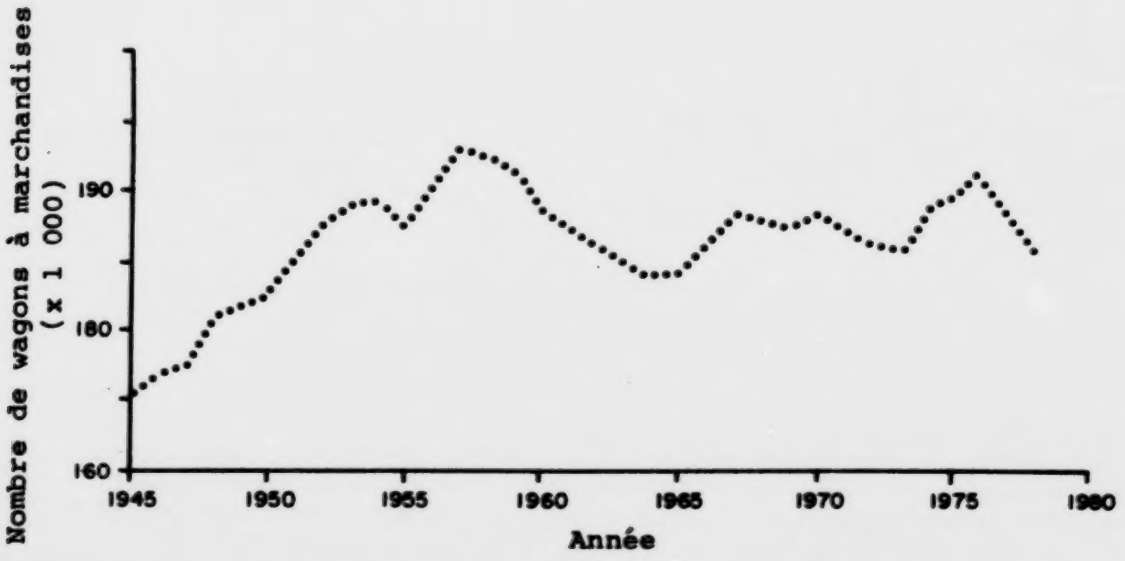
5.3 Tendances actuelles

5.3.1 Examen des statistiques

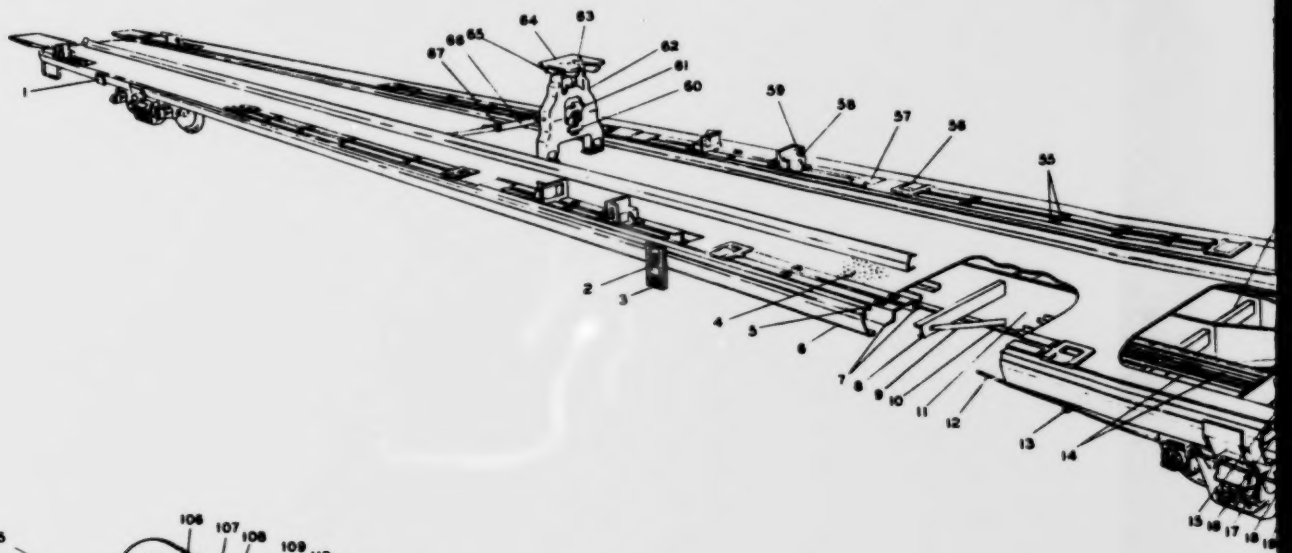
Depuis 1945, le nombre total de wagons à marchandises en service au Canada a peu changé. Comme le montre la figure 5.7, le nombre total de wagons n'a augmenté que de 17,3 %, passant de 164 769 en 1945 à 193 325 en 1976. Ce total a depuis été réduit à 182 138 en 1978. À l'exception des wagons couverts, le nombre des différents types de wagons a diminué lentement (voir le tableau 5.1).

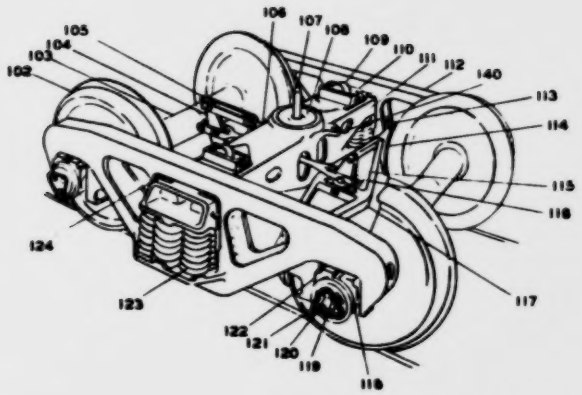
Figure 5.7

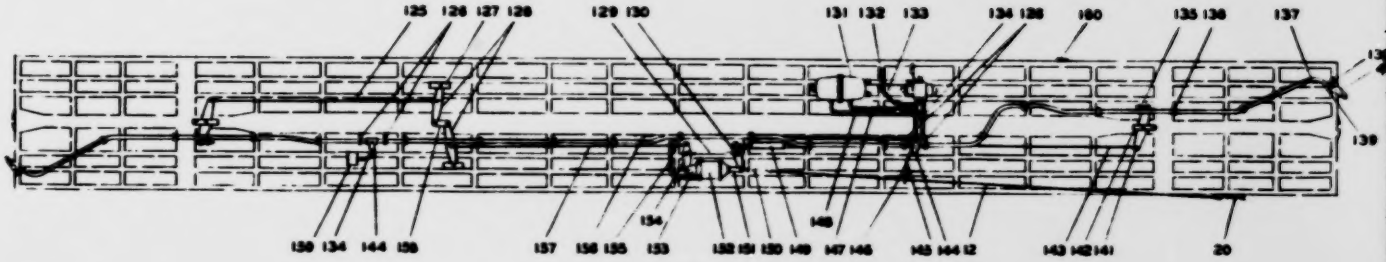
WAGONS À MARCHANDISES EN SERVICE, 1945-1978



Source: [51]

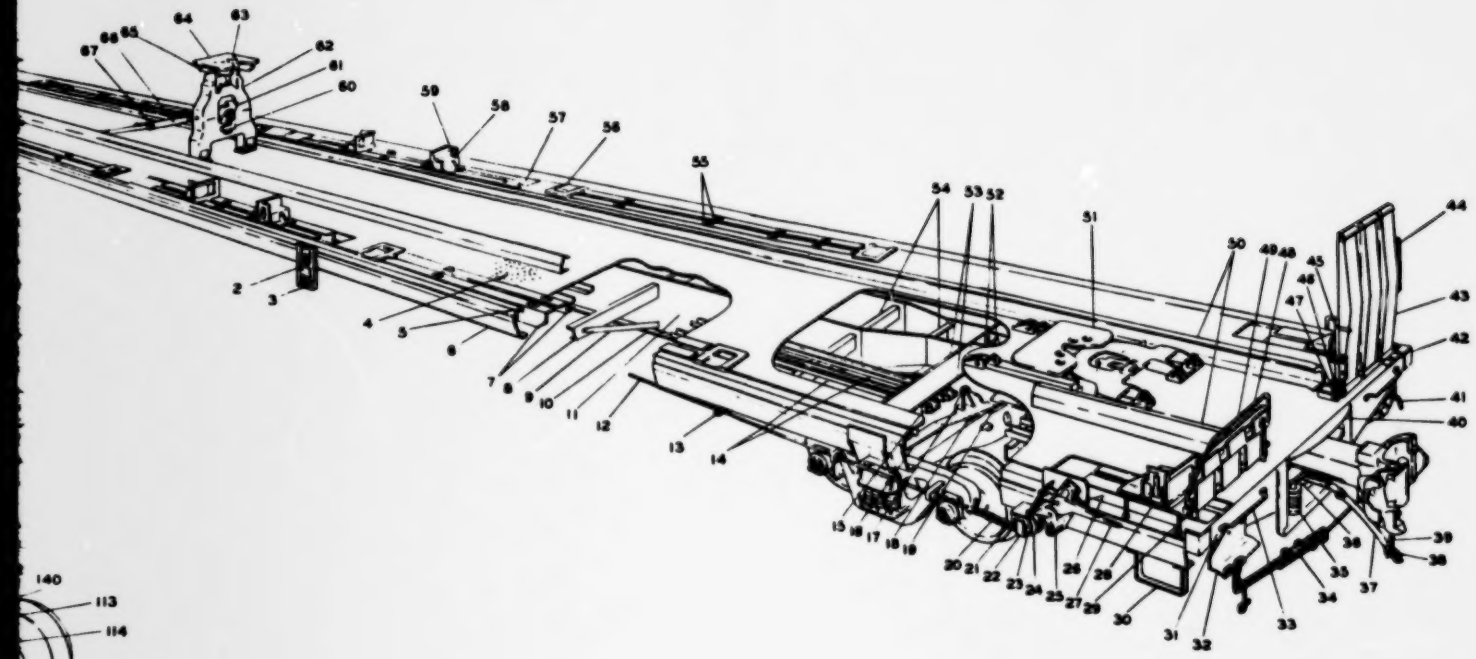




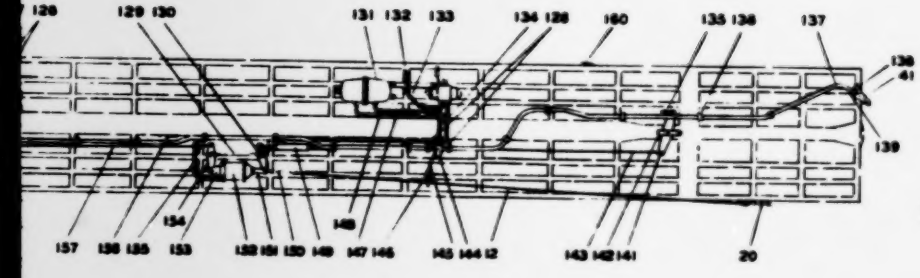


© 1970, The Railway Educational Bureau,
1809 Capitol Avenue,
Omaha, Nebraska 68102

Simmons-Boardman Publishing Corporation


64 63
65 66 67
62
61
60
59
58
57
56
55
54 53 52
51
50 49 48
45
46
47
44
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 27 28 29 30 31 32

140
113
114
115
116
117


126
129 130
131 132 133
134 128
160
135 136
137
138
41
139
157 156 155 153 154 152 151 150 149 148 147 146 145 144 12 143 142 141 20

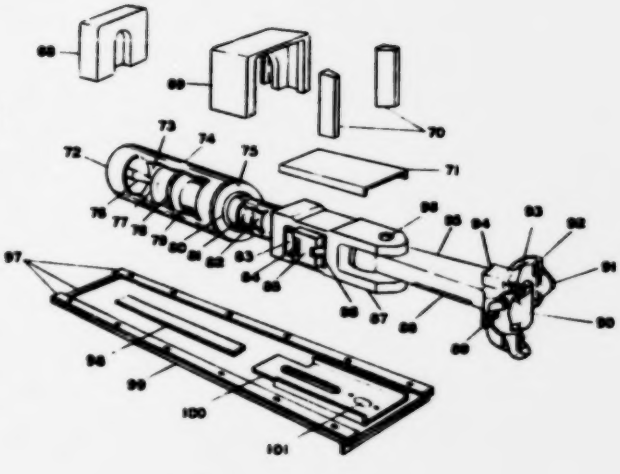

68
69
70
71
72
73
74
75
76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101

Figure 5.6

WAGON PLAT TOUS USAGES

Transport de conteneurs/remorques sur wagon plat, modèle TTX

1- Porte-étiquettes d'acheminement
2- Panneau ACI
3- Support de panneau ACI
4- Peinture de plancher antidérapante
5- Brancard
6- Renfort de brancard
7- Rail de conteneur
8- Traverse intermédiaire
9- Entretoise diagonale de traverse intermédiaire
10- Plaque de recouvrement inférieure de longrine centrale
11- Âme de longrine centrale
12- Tige de frein à main
13- Guide de la tige du frein à main
14- Longrine de plancher
15- Support de longrine
16- Plaque de recouvrement inférieure de traverse
17- Jambe de force de glissoir
18- Glissoir de caisse
19- Pivot de caisse
20- Chaîne de frein à main
21- Plaque de montage du frein à main
22- Couvre-chaîne
23- Support de poulie
24- Poulie
25- Carter de l'engrenage du frein à main
26- Manette de déblocage du frein à main
27- Levier du frein à main
28- Poignée latérale
29- Penture de la plaque de fixation
30- Marchepied en étrier
31- Traverse extrême
32- Support du levier de dételage
33- Poignée horizontale de bout
34- Tige de dételage téléscopique
35- Ressort du berceau d'attelage
36- Berceau d'attelage
37- Boyau d'accouplement du frein à air
38- Tête d'accouplement du frein à air
39- Chaîne de boyau d'accouplement de frein à air
40- Plaque de choc
41- Robinet d'arrêt
42- Chapeau d'angle
43- Plaque de fixation principale
44- Poignée de la plaque de fixation principale
45- Goupille de la plaque de fixation
46- Guide de la goupille
47- Serrure à ressort (plaque de fixation)
48- Plaque de fixation auxiliaire
49- Poignée de la plaque de fixation auxiliaire
50- Rail intérieur
51- Attelage de remorque rétractable de modèle 4 de ACF (sans système de choc, fonctionnant à tracteur)
52- Fourrure centrale de traverse
53- Âme de traverse
54- Renfort de longrine centrale
55- Ouvertures pour les oreilles des socles
56- Socle de conteneur (en position fermée)
57- Logement pour le socle
58- Socle rétractable (en service)
59- Mécanisme de blocage automatique du conteneur
60- Barre de tirage de la remorque
61- Buttoir de démontage
62- Support vertical
63- Mâchoires de verrouillage à pivot
64- Plaque de montage
65- Indicateur du verrouillage des mâchoires
66- Support diagonal
67- Indicateur du verrouillage du support
68- Moulage de la butée
69- Butée arrière
70- Butée avant
71- Guide supérieur de l'étrier
72- Système de choc de bout FREIGHT-SAVER F15 de ACF
73- Chambre des fluides
74- Cylindre extérieur
75- Adapteur de la bague de presse-étoupe
76- Cheville de mesurage
77- Coussinet du piston
78- Butée du piston
79- Piston
80- Écrou de presse-étoupe
81- Piston libre
82- Chambre à air (système de rappel)
83- Bloc arrière
84- Coussinet
85- Bloc avant
86- Plaque de charge préalable
87- Étrier
88- Plaque d'usure de l'attelage
89- Poche d'alignement vertical de l'attelage
90- Étrier d'attelage
91- Oreille d'alignement vertical de l'attelage
92- Tête d'attelage de type F
93- Axe d'attelage
94- Saillie d'arrêt
95- Bras d'attelage
96- Cheville d'attelage
97- Barres de fourrure
98- Barre de soutien du cylindre
99- Plaque de recouvrement inférieure du système de choc
100- Guide inférieur de l'étrier
101- Ouverture d'accès de la cheville d'attelage
102- Roue
103- Essieu
104- Balancier de renvoi
105- Pivot du balancier de renvoi
106- Support du pivot du balancier de renvoi
107- Cheville ouvrière
108- Crapaudine
109- Rouleau latéral
110- Guide du rouleau latéral
111- Traverse danseuse
112- Balancier équilibreur
113- Clavette du sabot de frein
114- Sabot de frein
115- Balancier d'essieu vertical
116- Tige de connexion du levier du bogie
117- Triangle de frein
118- Roulement à rouleaux
119- Frein de vis de blocage
120- Boulon de blocage
121- Plaque de blocage
122- Adapteur de roulement à rouleaux
123- Ressort de bogie
124- Patin d'amortisseur à frottement
125- Tige supérieure - bout A
126- Fixation du té de la conduite dérivée
127- Pivot du levier auxiliaire
128- Levier auxiliaire
129- Tige de connexion du levier du piston
130- Levier du piston
131- Réservoir auxiliaire et d'urgence combiné
132- Valve de retenue
133- Conduite de retenue - 3/8"
134- Conduite dérivée - 1"
135- Manille du levier de la traverse danseuse
136- Collier de retenue de la conduite générale
137- Conduite générale - 1 1/4"
138- Support du robinet d'arrêt
139- Étrier du robinet d'arrêt
140- Support du pivot du levier de la traverse danseuse (coulé dans la traverse danseuse)
141- Levier de la traverse danseuse
142- Pivot du levier de la traverse danseuse
143- Tige supérieure - bout B
144- Té de la conduite dérivée
145- Tringle de rappel
146- Guide de la tringle de rappel
147- Conduite du réservoir auxiliaire - 3/4"
148- Conduite du réservoir d'urgence - 3/4"
149- Régulateur automatique des freins
150- Chaîne de la tige du piston
151- Tige du piston
152- Cylindre de frein
153- Support du balancier à point fixe
154- Balancier à point fixe
155- Conduite du cylindre de frein
156- Plaque de vérification de la timonerie
157- Tige du levier auxiliaire
158- Tige d'assemblage du levier auxiliaire
159- Valve-relais de démultiplication
160- Porte-étiquettes de réforme

Longueur 90 pieds

Capacité 130 000 livres

Tableau 5.1

WAGONS À MARCHANDISES EN SERVICE AU CANADA*,
1974-1978

Wagons porte-automobiles	Nombre	Capacité	
		Totale	Moyenne
		(Tonnes de 2 000 livres)	
1974	2 617	171 390	65,9
1975	2 776	184 345	66,4
1976	3 465	231 416	66,8
1977	3 411	226 140	66,3
1978	3 570	237 551	66,5
Wagons à ballast			
1974	2 296	142 497	62,1
1975	2 199	137 497	62,5
1976	2 670	172 450	64,6
1977	2 652	175 010	66,0
1978	2 530	169 590	67,0
Wagons couverts			
1974	95 538	4 895 704	51,2
1975	92 669	4 785 923	51,6
1976	88 644	4 618 624	52,1
1977	83 478	4 373 749	52,4
1978	80 676	5 259 007	52,3
Wagons plats			
1974	24 898	1 632 396	65,6
1975	25 722	1 704 911	66,3
1976	26 305	1 779 376	67,6
1977	25 081	1 700 036	67,8
1978	24 562	1 686 352	68,7

* Exclus les wagons des sociétés ferroviaires privées.

	Nombre	Capacité	
		Totale	Moyenne
		(Tonnes de 2 000 livres)	
Wagons-tombereaux			
1974	20 414	1 563 410	76,6
1975	21 370	1 670 667	78,2
1976	21 377	1 655 721	77,5
1977	20 291	1 570 796	77,4
1978	19 773	1 574 747	79,7
Wagons-trémies			
1974	27 398	2 257 938	84,1
1975	29 287	2 464 290	84,1
1976	31 801	2 710 721	85,2
1977	33 387	2 869 372	86,0
1978	32 672	2 818 778	86,3
Wagons à minerai			
1974	7 151	616 986	86,3
1975	7 731	676 768	87,5
1976	8 236	727 580	88,3
1977	8 661	770 980	89,0
1978	8 551	742 230	86,8
Wagons frigorifiques			
1974	4 772	285 592	59,8
1975	5 016	305 942	61,0
1976	4 898	300 232	61,3
1977	4 685	290 278	62,0
1978	4 591	270 130	58,8
Wagons à bestiaux			
1974	2 463	110 948	45,0
1975	2 359	106 375	45,1
1976	2 093	94 845	45,3
1977	1 924	87 455	45,5
1978	1 734	79 045	45,6

	Nombre	Capacité	
		Totale	Moyenne
		(Tonnes de 2 000 livres)	
Wagons-citernes			
1974	494	25 831	52,3
1975	379	18 417	48,6
1976	325	16 935	52,1
1977	324	17 018	52,5
1978	268	15 170	56,6
Autres			
1974	2 851	151 750	53,2
1975	3 689	198 210	53,7
1976	3 511	188 976	53,8
1977	3 289	177 886	54,1
1978	3 211	173 846	54,1
Total			
1974	190 892	11 855 442	62,3
1975	193 197	12 253 345	63,4
1976	193 325	12 496 876	64,6
1977	187 183	12 258 720	65,5
1978	182 138	12 026 446	66,0

Source: [51]

Le nombre de wagons couverts est passé de 99 904 en 1971 à 80 676 en 1978, soit une diminution de 19 % en sept ans. Cette situation est attribuable à l'utilisation accrue du transport de conteneurs/remorques sur wagon plat et de wagons bâtis à d'autres fins. Les wagons à marchandises sont maintenant construits pour des marchandises particulières alors que dans le passé, les marchandises à transporter devaient s'enclaver dans les wagons disponibles à l'époque. Un bon exemple de ce changement est le wagon porte-automobiles à trois étages. Transportées auparavant dans des wagons couverts, les automobiles sont maintenant chargées sur des wagons spéciaux à trois étages. L'inconvénient des wagons particuliers est qu'ils sont généralement vides lorsqu'ils reviennent de leur destination au point de chargement. À titre d'exemple, mentionnons le transport du charbon entre l'intérieur de la Colombie-Britannique et l'Alberta à destination des ports de la côte ouest.

La figure 5.8 montre que cette situation n'a pas tellement influé sur les wagons-milles vides transportés. Pour n'importe quelle année entre 1969 et 1978, les wagons-milles vides représentent environ 40 % du total.

Grâce à l'utilisation d'acier à haute résistance et à une optimalisation de l'emplacement de cet acier, la capacité des wagons a pu s'accroître de façon régulière. À l'heure actuelle, il s'agit essentiellement d'échanger le poids à vide des wagons par une charge utile accrue, au lieu d'accroître le poids brut, car la charge par essieu a maintenant atteint son maximum. Cette situation est illustrée à la figure 5.9.

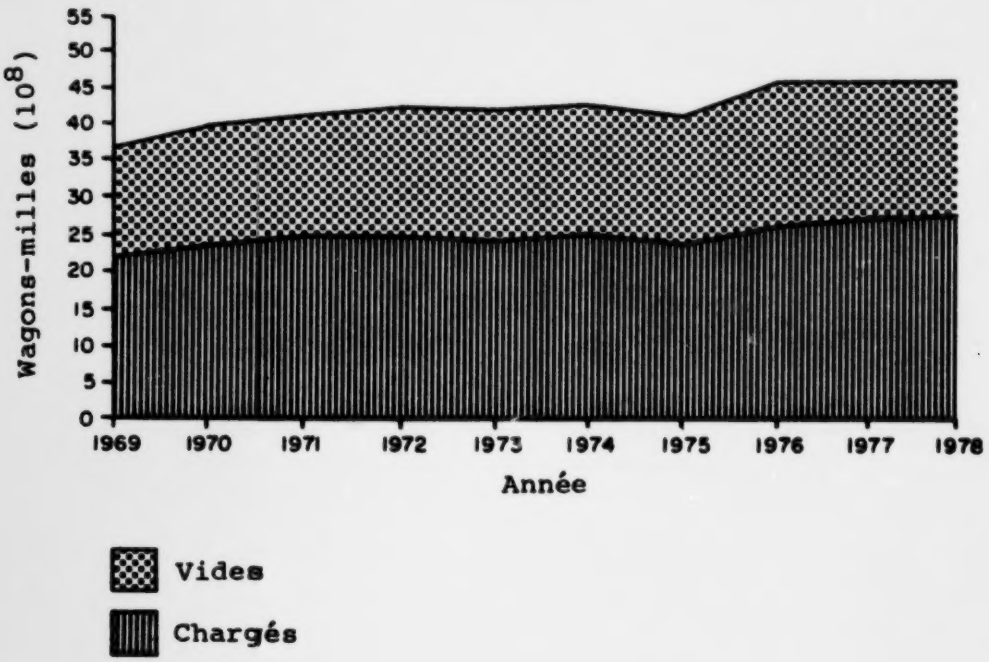
Bien que le nombre total de wagons ait très peu changé, le tonnage de marchandises transportées a presque doublé entre 1961 et 1978 (voir la figure 5.10). Cette augmentation est surtout attribuable à la capacité accrue des wagons car le nombre de wagons-milles et leur utilisation n'ont pas augmenté de façon sensible.

5.3.2 Wagons couverts

Les wagons couverts servent maintenant surtout à transporter les marchandises et les produits de valeur qu'il faut protéger contre les intempéries ou les dommages. Outre le type ordinaire de wagon couvert qui sert au transport de marchandises ordinaires, il existe des wagons couverts qui sont faits pour recevoir les produits propres à certaines industries, comme les pièces d'automobiles, le bois de construction, les produits alimentaires, les appareils électriques et certaines marchandises en vrac [49].

Figure 5.8

WAGONS-MILLES CHARGÉS ET VIDES TRANSPORTÉS
PAR ANNÉE, 1969-1978



Source: [52]

Figure 5.9

CAPACITÉ MOYENNE D'UN WAGON À MARCHANDISES, 1930-1978

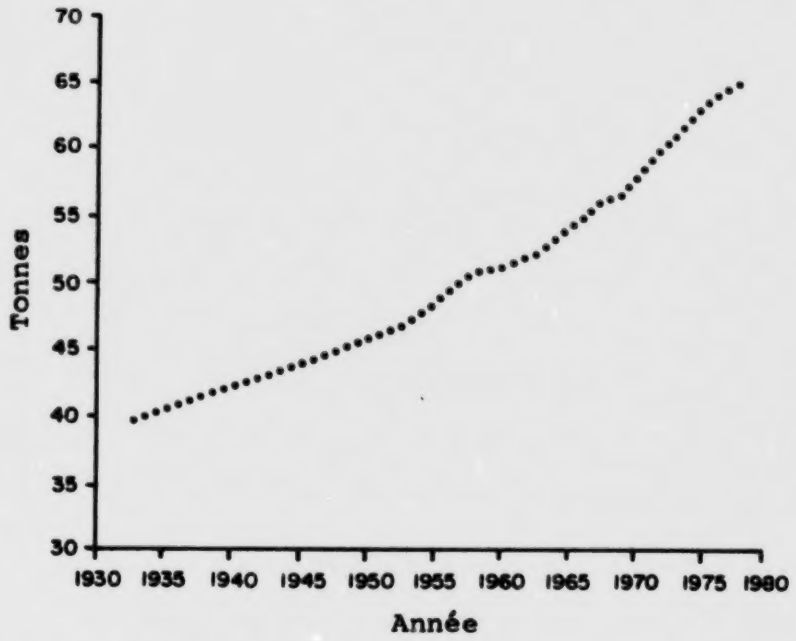
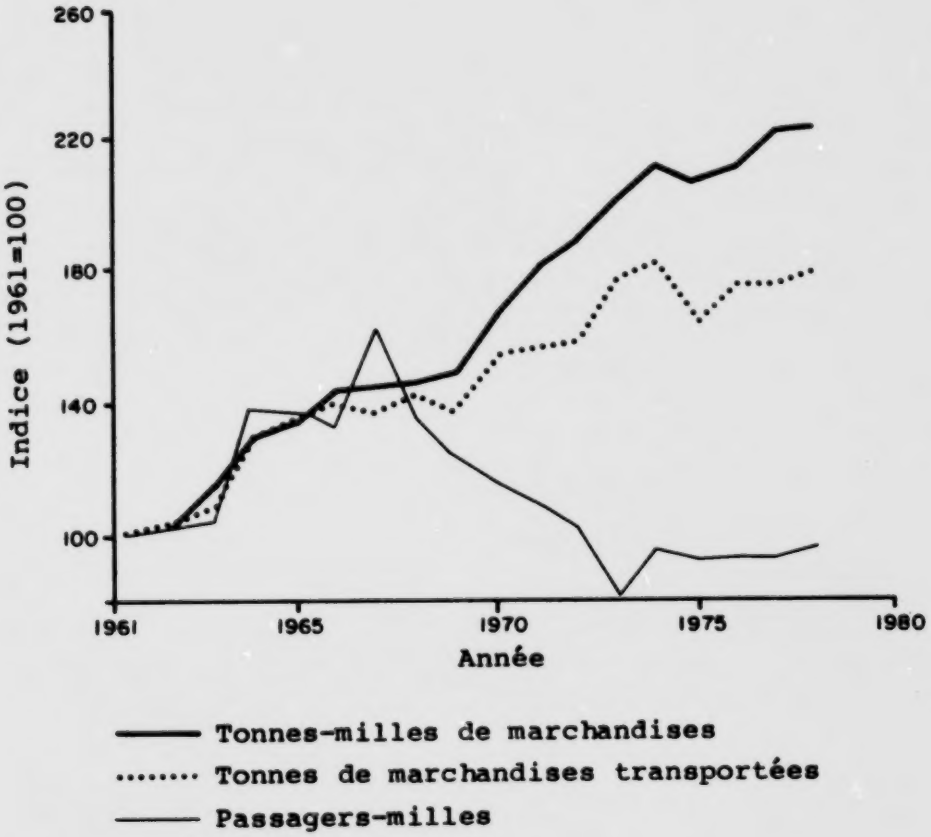


Figure 5.10

COURBE DU TRAFIC, CHEMINS DE FER PUBLICS
AU CANADA, 1961-1978



Source: [52]

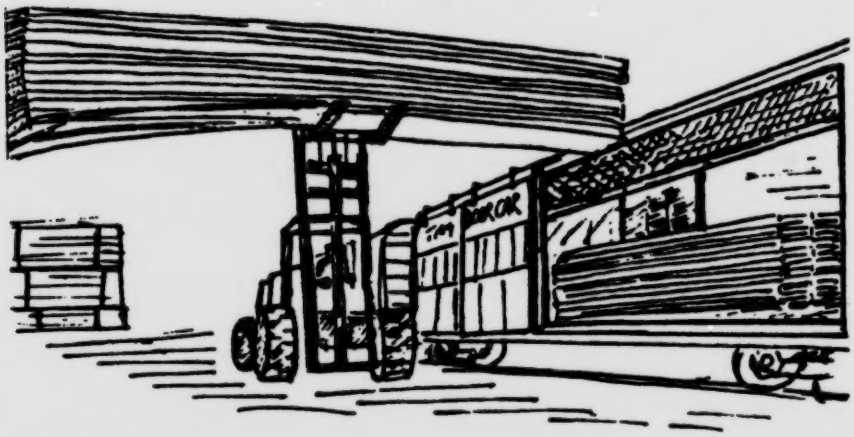
Parmi les innovations récentes, il faut mentionner l'utilisation de longerons coulissants et de systèmes de choc de bout dans les wagons couverts qui transportent des marchandises fragiles. Ces dispositifs peuvent comprendre des sacs d'air ou des ressorts montés à l'intérieur du wagon afin de prévenir les dommages durant les manoeuvres ou en l'absence de jeu entre les wagons. On se sert maintenant davantage de dispositifs de retenue des charges pour prévenir des dommages aux marchandises.

À mesure que la manipulation des marchandises s'est mécanisée (chariots élévateurs à fourches, courroies de transport, etc.), on a attaché de plus en plus d'importance à l'efficacité des portes. Les wagons ayant des portes très larges, qui peuvent mesurer jusqu'à la moitié de la longueur du wagon, sont particulièrement efficaces lorsqu'il s'agit de charger et de décharger des articles larges ou longs, comme du bois de construction. La largeur des portes permet de réduire le temps passé au terminal et de diminuer l'endommagement des cargaisons durant les activités de chargement et de déchargement. On trouvera à la figure 5.11 la représentation d'un wagon couvert typique à porte large.

Les wagons d'aujourd'hui à capacité élevée qui transportent des marchandises de faible densité peuvent dépasser les 7 000 pieds cubes, alors que la capacité en poids peut atteindre les 100 tonnes. Les poids à vide sont de l'ordre de 20 tonnes.

Figure 5.11

WAGON COUVERT À PORTE LARGE



L'ouverture de porte de 25 pieds permet de charger et de décharger rapidement le bois et les produits de construction à l'aide d'un chariot élévateur à fourches.

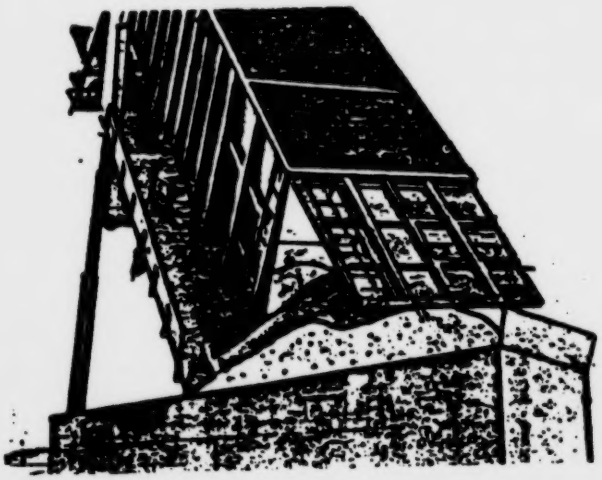
Source: [56]

5.3.3 Wagons-tombereaux

Le wagon-tombereau de base possède des bouts fixes et un plancher plein. Cependant, les industries ont demandé des wagons-tombereaux particuliers. L'industrie de l'acier, par exemple, a encouragé la création de wagons de forte capacité et à côtés élevés pour transporter des objets, des conduites et des tôles de format plus long [49]. Une bonne partie des wagons-tombereaux récents ont une capacité de 100 tonnes et une longueur de plus de 65 pieds. L'industrie forestière a demandé des wagons de grand volume pour transporter des marchandises d'une densité relativement faible comme les copeaux. Ces wagons peuvent avoir une capacité de l'ordre de 100 tonnes et de plus de 7 000 pieds cubes. Ils peuvent être munis de dispositifs spéciaux pour le déversement pivotant ou à bascule. La figure 5.12 montre un wagon d'une capacité de 7 500 pieds cubes ou 100 tonnes, monté sur un treuil hydraulique et en train de déverser sa cargaison par une porte d'extrémité.

Figure 5.12

WAGON-TOMBEREAU DÉVERSANT DES COPEAUX PAR L'EXTRÉMITÉ



Source: [56]

Les wagons-tombereaux utilisés pour l'industrie forestière comportent d'autres innovations, comme des intérieurs doublés, des grillages ou des capots légers pour protéger les marchandises en cours de route.

Depuis quelques années, la société Thrall Car Company a consacré beaucoup d'efforts en vue d'améliorer le wagon-tombereau tous usages. Son produit le plus récent, appelé "railgon", a été introduit en 1980. Le nouveau wagon-tombereau utilise en fait environ 8 000 [54] livres d'acier de plus que les wagons-tombereaux comparables. Le placement du métal, par rapport à son intégrité structurelle, a fait l'objet de beaucoup d'attention lors de la conception du "railgon". De cette façon, on accorde moins d'importance à l'accroissement de la charge utile pour se concentrer davantage sur la réduction des frais d'entretien.

Le "railgon" a une longueur intérieure de 52 ½ pieds, une capacité de 2 494 pieds cubes, un poids à vide de 71 000 livres et une charge de 192 000 livres [54].

Les plus récents wagons-tombereaux comportent les caractéristiques suivantes:

a) certaines composantes stratégiques de la caisse des wagons ont été renforcées de manière à réduire la nécessité de réparer certaines pièces qui ont depuis toujours exigé un entretien fréquent;

b) les goupilles de fixation à certains points de la caisse vont répartir les forces qui ont souvent causé des dommages à des structures rigides;

c) les échelons des échelles sont, de par leur structure même, à l'abri des dommages; et

d) l'intérieur blanc plus visible pour les grutiers empêche les dommages durant le chargement.

L'industrie du charbon a été à l'origine d'une bonne partie des améliorations qui ont été apportées à la conception des wagons-tombereaux à charbon. L'innovation la plus remarquable est la partie surbaissée entre les bogies qui permet de charger plus de marchandises (habituellement de l'ordre de quatre à six tonnes). Cette amélioration permet d'utiliser moins de wagons dans un train typique, ce qui réduit par le fait même les coûts initiaux et les frais d'entretien totaux. De plus, la section surbaissée a pour effet d'abaisser le centre de gravité, accroissant ainsi la stabilité, réduisant l'usure et donc les frais d'entretien.

Les wagons sont normalement déchargés par un déverseur pivotant qui tourne le wagon pour le vider au poste de déchargement.

5.3.4 Wagons-trémies

Le wagon-trémie est semblable au wagon-tombereau, mais il comporte en plus des portes qui permettent le déchargement par le fond.

Les wagons-trémies ouverts à la partie supérieure sont très largement utilisés pour le transport du charbon. Ces wagons autodéchargeurs transportent également d'autres marchandises à forte densité, notamment la pierre, le ballast et le minerai. Les wagons dont la caisse comporte un volume élevé sont utilisés pour transporter des matériaux de faible densité, comme le coke, le bran de scie et les copeaux. Sauf lorsqu'ils sont conçus pour des cargaisons de très faible densité, ces wagons sont maintenant presque toujours construits pour une charge utile de 100 tonnes. L'utilisation accrue de ces wagons dans les trains à plusieurs unités a donné lieu à la création de portes électriques, dont certaines sont complètement automatiques. Ces systèmes permettent aux trains d'augmenter l'utilisation des wagons [49]. L'avenir à long terme des wagons-trémies pour le charbon est incertain, en raison du développement des pipe-lines à schlamms (ou pipe-lines de solides) comme moyen de transport de rechange. Les économies relatives pourraient entraîner une chute du nombre des wagons-trémies pour le service de transport du charbon.

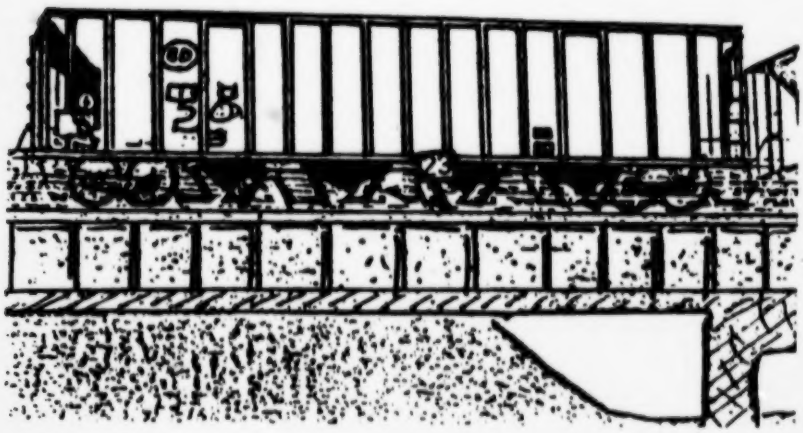
La figure 5.13 montre un wagon-trémie moderne utilisé lors du déchargement automatique d'un train. Ce wagon a une capacité de 100 tonnes et de 3 750 pieds cubes, et peut vider une cargaison complète en 13 secondes ou moins. Le déchargement est mis en branle par un courant continu le long de la voie. Ce courant actionne une valve pneumatique, laissant pénétrer l'air sous pression dans un vaste cylindre et mettant en marche un mécanisme qui ouvre 16 portes de déchargement. Cette caractéristique est importante si le charbon doit être déchargé par temps froid [56].

5.3.5 Wagons-citernes

La plupart des wagons-citernes qui sont actuellement fabriqués sont de l'ordre de 100 tonnes et de 30 000 gallons, avec un nombre limité d'unités plus grandes. La plupart de ces wagons se servent du réservoir lui-même comme partie intégrante de la structure plutôt que d'utiliser un châssis distinct pour transmettre les forces de tirage et d'amortissement longitudinales. Ceci a pour effet de réduire le poids à vide en éliminant les longerons qui étaient utilisés dans le passé. Afin d'atteindre des capacités pouvant aller jusqu'à 60 000 gallons, certains wagons-citernes sont montés sur des paires de bogies à six roues ou une paire de bogies à quatre roues à chaque extrémité du wagon.

Figure 5.13

WAGON À CHARBON DE 100 TONNES À DÉCHARGEMENT AUTOMATIQUE



Source: [56]

Les wagons-citernes transportent une gamme variée de produits pétroliers, de produits chimiques, d'huiles végétales et de poissons, de jus de fruits, de sirops, d'aliments liquides pour les animaux, etc. Un fabricant canadien, la compagnie Procor d'Oakville (Ontario), fabrique un wagon unique à écoulement double. Ce wagon, qui est illustré à la figure 5.14, peut être déchargé par pression ou par gravité. Il a une capacité de 100 tonnes et fonctionne à une pression pouvant aller jusqu'à 30 lb par po^2.

Parmi d'autres variantes de ce type de wagon, mentionnons le modèle "Tank-Train" fabriqué par la compagnie General American. On peut relier jusqu'à 40 wagons-citernes grâce à un tuyau de remplissage souple qui unit chaque wagon au suivant. Les wagons sont alors chargés ou déchargés à partir d'un seul point au lieu de déplacer le train pour charger ou décharger individuellement chaque wagon. Ce système permet de charger jusqu'à 3 000 gallons américains de liquides par minute, à l'aide d'un système fermé plus propre et plus sûr. Les usagers du modèle "Tank-Train" aux États-Unis ont réduit leurs frais de manutention jusqu'à concurrence de 50 % [58].

Figure 5.14

WAGON-CITERNE À ÉCOULEMENT DOUBLE DE PROCOR

Source: [49]

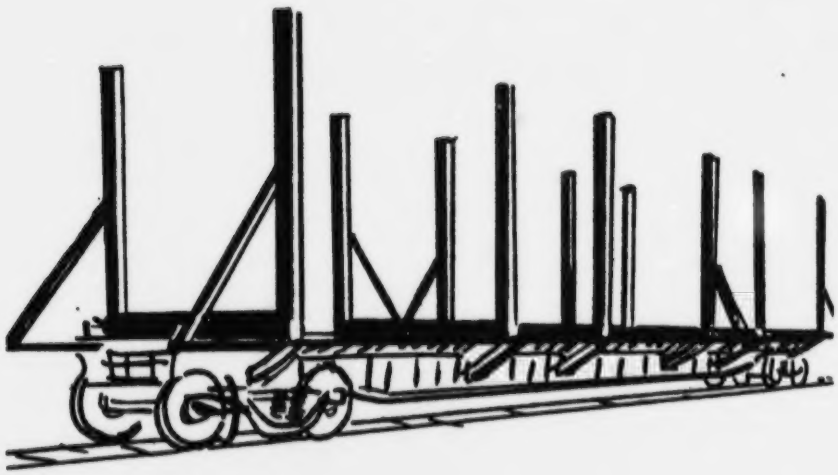
5.3.6 Wagons plats

Les wagons plats à parois de bout (avec une paroi ou un montant à chaque extrémité) servent au transport de produits forestiers comme le bois à pâte, le contre-plaqué et le placoplâtre, ou des produits manufacturés comme les tubes, les poteaux et les bobines en acier. Les wagons plats peuvent être munis de capots, comme ceux des wagons-tombereaux, pour le transport des bobines d'acier. Des wagons plats munis de ranchers, pouvant mesurer jusqu'à 90 pieds de long, servent à transporter de longs billots ou poteaux. Un wagon de ce type est illustré à la figure 5.15. Cette unité d'une capacité de 100 tonnes a été conçue pour transporter plus de quatre charges de bois en grume.

Pour les charges extrêmement lourdes, on utilise des wagons plats spéciaux à 16 essieux. La plate-forme du wagon plat repose sur deux bogies à 8 essieux et peut supporter jusqu'à 880 000 livres.

Figure 5.15

WAGON PLAT À BILLOTS



Source: [56]

Un autre wagon utilisé pour transporter les charges extrêmement lourdes est le wagon "Schnabel". Ce wagon est constitué de deux unités distinctes qui peuvent être reliées pour former une seule caisse. Les unités sont séparées et la charge est insérée entre les deux, puis elle est immobilisée pour former une unité de transport complète. Ces wagons servent à transporter des transformateurs et ont une capacité de l'ordre de 1 000 000 de livres.

5.3.7 Innovations européennes

En Europe, les chemins de fer sont largement utilisés pour transporter des produits de valeur grâce à des services de transport rapides qui font concurrence au transport routier sur les courtes distances. Les plus récentes innovations qui peuvent s'appliquer aux wagons de l'Amérique du Nord sont les améliorations qui ont été apportées à la conception des portes des wagons couverts, dans le but d'accélérer le chargement et le déchargement et par conséquent de réduire le temps passé au terminal.

Un fabricant italien, la compagnie Costanasnaga, a mis au point un wagon muni d'un capot qui peut être rentré, de sorte que rien ne vient entraver le chargement [59]. Les faces et le toit arrondi sont formés d'un châssis de métal recouvert d'un tissu. Le châssis de métal se rétracte à partir d'une extrémité, ce qui amène le tissu à se plier et à créer une grande ouverture. Avec ses faces et son toit souples, ce wagon léger convient pour le transport de marchandises encombrantes comme des machines. Il a une capacité de quelque 5 000 pieds cubes.

La compagnie Wagonfabrik Verdingen a conçu et produit un wagon d'une longueur de 70 pieds pour les déplacements entre la Grande-Bretagne et l'Europe continentale [59].

Ce wagon comprend deux portes coulissantes sur chaque face, qui donnent une ouverture de 33 pieds. Le dégagement vertical est suffisant et le plancher est assez fort (il peut supporter des charges de 5,5 tonnes) pour permettre à des chariots élévateurs de transporter les marchandises directement dans le wagon. Des anneaux sont fixés au châssis, aux parois et au toit. Il est donc possible d'attacher solidement des marchandises de toutes formes.

Un wagon construit par la compagnie Linke-Hofman-Busch pour transporter des rouleaux de tôle utilise un système téléscopique unique pour le toit et les parois [59]. Trois capots, qui représentent chacun le tiers de la longueur du wagon, font fonction de toit et de parois. Le capot du milieu et celui de l'avant peuvent être ramenés sous le capot de l'arrière, exposant ainsi les deux tiers du wagon. Les chariots élévateurs ou les grues peuvent ainsi avoir facilement accès aux marchandises.

5.3.8 Aérodynamique

L'intérêt pour la conservation de l'énergie a fait ressortir la nécessité de réduire la résistance aérodynamique des wagons à marchandises. À 100 kilomètres par heure, la résistance aérodynamique consomme 0,04 gallon américain par wagon-mille [28]. On effectue actuellement des essais en soufflerie qui aboutiront à des essais complets des unités de wagons. Les essais en soufflerie ont démontré que les pires contrevenants étaient les wagons plats vides et les wagons-trémies ouverts à la partie supérieure. Ces unités causent une résistance aérodynamique considérable en raison de l'espace d'air qu'elles forment entre les autres wagons lorsqu'elles sont placées au milieu d'un train. La turbulence d'air qui est créée par cet espace est à l'origine de la résistance accrue.

5.4 Quelques innovations du transport intermodal

5.4.1 Wagons plats articulés

Les wagons plats articulés sont conçus spécialement pour transporter des remorques ou des conteneurs. Les wagons sont disposés par groupes de 10 unités au maximum et chaque paire d'unités partage une série commune de roues. Ce système permet de réduire considérablement le poids à vide en diminuant de moitié le nombre de bogies nécessaires pour le train articulé. Il a été lancé par la Sante Fe Railroad en 1977. Comme projet pilote, la compagnie a utilisé une série de 6 wagons articulés de remorques/conteneurs [60]. Les wagons ont été conçus pour transporter des conteneurs ou des remorques de 40 ou 45 pieds. Le système, connu dans l'industrie sous le nom de "Six-Pack", s'est révélé efficace et la Sante Fe a commencé à mettre les unités en groupes de 10, ou "Ten-Packs". Les "Ten-Packs" sont en service payant entre Chicago et Los Angeles (un parcours rapide) depuis 1978 [61]. Sur ce trajet, les wagons articulés ont réduit la consommation de carburant de 6 000 gallons américains par voyage aller et retour, comparativement aux wagons plats classiques. Il s'agit là d'une économie possible de 300 000 gallons américains de carburant diesel par année, pour un seul train en service ordinaire [62]. Un autre avantage mentionné par les sociétés ferroviaires est la réduction de l'usure des roues et des rails.

La société Budd Car Company est en train de mettre au point un système similaire, avec quelques perfectionnements additionnels. Appelé "Lo-Pac 2000", ce train articulé de plusieurs unités est capable de transporter des conteneurs (jusqu'à 40 pieds de long) ou des remorques (jusqu'à 45 pieds de long), avec des wagons frigorifiques. Lorsqu'une remorque de 13 ½ pieds est montée sur la partie surbaissée, le haut de la remorque n'est pas plus de 14 pieds et 7 pouces au-dessus du rail. Lorsque la même remorque est montée sur un wagon plat ordinaire, le haut de la remorque s'élèverait à environ 16 pieds

et 2 pouces au-dessus du rail. Ce profil plus bas atténue les problèmes relatifs au dégagement vertical sur certaines lignes ferroviaires et améliore l'économie de carburant en réduisant la résistance aérodynamique. Ces wagons ont été mis en service payant en novembre 1980 entre New York et Chicago [63].

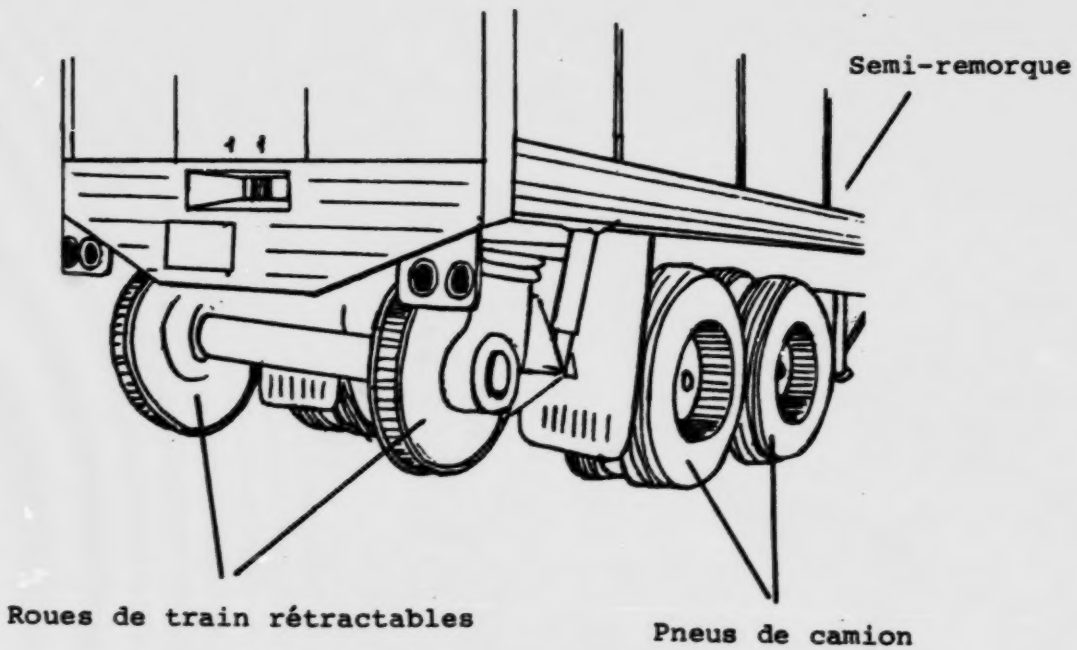
L'avenir de ces systèmes dépendra de la fiabilité des unités et de leur performance au niveau de la maintenance. Comme les 10 wagons d'une série forment une unité, s'il survient un problème dans l'un des wagons, il faut retirer du service toute la série à moins qu'on ne trouve une façon commode de séparer les unités.

5.4.2 Wagons-remorques

Le wagon-remorque illustré à la figure 5.16 est une semi-remorque équipée d'un ensemble de roues de train rétractables montées à l'arrière. Lorsque les roues de train sont baissées, les roues de camion sont soulevées et l'unité peut être tirée sur rail par une locomotive. Dans un proche avenir, des trains composés de 40 à 50 de ces unités seront tirés par une locomotive et des trains de 80 unités ou plus, par deux locomotives.

Figure 5.16

WAGON-REMORQUE



Source: [65]

Un train de 50 unités a récemment fait l'objet d'essais entre Alexandria en Virginie et Jacksonville en Floride. Le programme de 75 jours a débuté en octobre 1980 et a été effectué sous la surveillance de la Federal Railroad Administration [64]. En 1980, on a fabriqué 350 de ces unités à titre de projet collectif des sociétés Bi-Modal Corporation et North American Car Corporation [61].

Il ne s'agit pas du premier projet de ce genre. La compagnie Chesapeake and Ohio a exploité un parc de 80 wagons rail-route pendant 10 ans, à partir de 1959. Ils étaient utilisés pour transporter le courrier dans les trains voyageurs rapides, mais ont été éliminés graduellement à mesure que les services voyageurs diminuaient. Peu après, la compagnie British Rail a essayé 50 remorques rail-route, qui étaient une adaptation de celles de la Chesapeake and Ohio. Le projet a été abandonné en raison de certains conflits d'attributions entre les sociétés ferroviaires et les camionneurs [65].

La réduction de l'énergie et des capitaux nécessaires constitue le principal avantage du wagon-remorque. Une fois qu'il sera pleinement en service payant, il permettra de transporter la même quantité de marchandises qu'une remorque sur wagon plat classique, en utilisant de 40 % à 50 % de moins de carburant. Cette économie est attribuable à un certain nombre de facteurs, comme l'élimination du wagon plat, le poids léger (16 500 livres à vide, 59 500 livres avec une charge maximale) et une plus faible résistance aérodynamique, car il roule directement sur les rails) [66]. En tenant compte du coût unitaire (33 000 $ par remorque), le wagon-remorque sera environ 25 % moins coûteux à exploiter que le service actuel de transport rail-route, qui exige deux fois plus de locomotives et plus de carburant [67].

L'économie de carburant est encore plus importante, comme il faut s'y attendre, si l'on compare le wagon-remorque à la semi-remorque classique. Pour un voyage de 1 000 milles sur route, un camion-remorque typique utiliserait 115 gallons impériaux de carburant. Pour la même distance, une remorque sur wagon plat consommerait 76 gallons impériaux et un wagon-remorque utiliserait 43 gallons impériaux, en incluant le carburant additionnel nécessaire pour le transport local à destination et en provenance du terminal routier. Des prototypes de wagons-remorques roulent actuellement sur les chemins de fer canadiens et américains, mais la plus grande partie des essais sont effectués aux États-Unis.

Des économies substantielles seront également réalisées dans les terminaux. Comme le wagon-remorque doit monter sur le train et en descendre, le transfert se fait au moyen de camions (qui sont de toute façon nécessaires pour tirer la remorque) et non de chariots élévateurs ou de grues à portique qui coûtent cher. Il n'est pas nécesaire d'avoir de locomotives de manoeuvre ou de dépôts. Le mécanisme du wagon-remorque exécute

le transfert entre les pneus de camion et les roues de train en moins de temps qu'il n'en faut pour soulever les marchandises [63]. La remorque de 45 pieds a une capacité supérieure de 12 % à celle du wagon rail-route classique de 40 pieds. Ce facteur réduit les investissements nécessaires pour acheter les wagons plats servant au transport des unités.

Ce système de transport bimodal présente quelques inconvénients. Du point de vue du camion, le supplément de poids apporté par les roues de train réduira la charge utile disponible à l'intérieur des limites de poids permises pour la partie du voyage qui est effectuée sur route. Du point de vue du train, le wagon-remorque n'a peut-être pas l'intégrité structurelle des wagons conventionnels. À la longue, leur taux de défaillances pourrait être plus élevé. Les services de transport de remorques et de conteneurs sur wagon plat continueront de dominer si ce n'est qu'en raison du grand nombre de wagons plats et de wagons rail-route qui sont actuellement en service, et qui exigent des wagons plats. Le trafic roulier ("roll-on, roll-off") dans le transport maritime international, par exemple, continuera de stimuler la demande pour le service de transport de remorques sur wagon plat.

Il est également possible d'utiliser des conteneurs maritimes sur des wagons-remorques en déposant le conteneur sur le châssis ou en l'enlevant. Ce procédé annule cependant l'un des avantages inhérents du wagon-remorque, qui est de réduire la manutention dans le terminal.

La société Bi-modal Corporation, qui fabrique cette unité, prédit que d'ici 20 ans, 25 % de tout l'équipement de transport ferroviaire aux États-Unis sera composé de wagons-remorques.

5.4.3 Transport de conteneurs/remorques sur wagon plat à deux étages

Deux sociétés ferroviaires des États-Unis expérimentent actuellement des wagons plats capables de transporter des remorques ou des conteneurs sur deux étages. L'une de ces unités, qui est fabriquée par Trailer Train et utilisée de façon expérimentale par Union Pacific, est un prototype léger à double plate-forme de service de transport de remorques sur wagon plat. Monté sur deux essieux simples, le wagon est limité à une longueur de 33 pieds. On juge que c'est là la longueur maximale pour un wagon ayant des bogies qui ne pivotent pas lorsque le wagon négocie une courbe. Ces bogies simplifiés sont utilisés pour réduire le poids à vide comparativement à un wagon plat classique à 4 essieux.

Une deuxième idée qui fait l'objet d'essais par la Southern Pacific Railroad est un transporteur articulé de conteneurs à deux étages. Ce prototype peut transporter deux

caisses de 40 pieds superposées sur un wagon plat articulé. Ce système est semblable à celui qui a été traité à la section 5.4.1.

Ces deux innovations permettent de réduire le poids à vide pour un nombre donné de remorques et de conteneurs, mais présentent tout de même certains inconvénients inhérents. En raison de son poids plus élevé, le wagon plat chargé offrira une résistance aérodynamique plus forte et occasionnera des problèmes de dégagement sur certaines lignes. Avec deux conteneurs, l'unité est à peu près de la même hauteur qu'un wagon porte-automobiles à trois niveaux. Les opérations de chargement au terminal devront également être surveillées plus étroitement afin de s'assurer qu'on ne met pas un conteneur plus lourd sur un conteneur plus léger. Cette erreur pourrait nuire à la dynamique du wagon en élevant le centre de gravité.

5.4.4 Croissance du service de transport de conteneurs/ remorques sur wagon plat

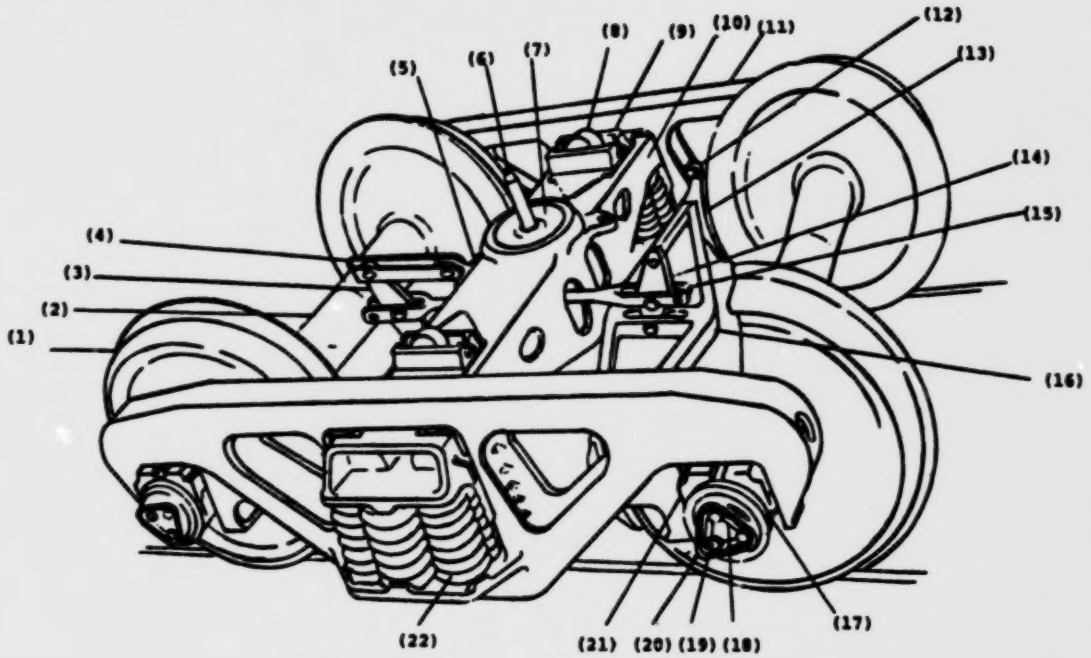
La croissance du service de transport de conteneurs/ remorques sur wagon plat est en relation étroite avec la croissance du transport maritime international qui, à son tour, dépend de l'économie mondiale. Les marchandises générales qui étaient expédiées en vrac jusqu'à 1970 sont maintenant presque toutes transportées dans des conteneurs. Cette tendance vers la conteneurisation du trafic et le nombre croissant d'entreprises de transport par mer/terre qui utilisent des "ponts terrestres" au lieu de routes complètement maritimes ont fait ressortir la nécessité d'accroître la capacité du service de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat. Il est maintenant courant de voir un bateau décharger l'équivalent de 1 000 conteneurs de 20 pieds en l'espace de 48 heures. Dans le cas des ponts terrestres, tout ce trafic est transporté par rail jusqu'au terminal final. Une étude approfondie du transport rail-route qui a été effectuée aux États-Unis prévoit des taux de croissance de 10 à 12 % par année jusqu'à 1990. Ces prévisions s'appuient sur les changements qui devraient se produire sur le plan du service, des prix du carburant et de la collaboration intermodale [68]. Au Canada, le CN signale actuellement une croissance de 15 % par année du trafic intermodal, comparativement à une croissance de 5 % pour le trafic par chargement de wagons [67].

5.5 Bogies de wagons

Le bogie relie les roues à la caisse ou au châssis du wagon et permet un certain pivotement par rapport à la caisse du wagon lorsque le train négocie une courbe. La figure 5.17 montre un bogie typique. Des bogies à trois essieux sont parfois utilisés pour les charges plus lourdes.

Figure 5.17

BOGIE DE WAGON À DEUX ESSIEUX



1- Roue
2- Essieu
3- Balancier de renvoi
4- Pivot du balancier de renvoi
5- Support du pivot du balancier de renvoi
6- Cheville ouvrière
7- Crapaudine
8- Rouleau latéral
9- Guide du rouleau latéral
10- Traverse danseuse
11- Balancier équilibreur
12- Clavette du sabot de frein
13- Sabot de frein
14- Balancier d'essieu vertical
15- Tige de connexion du balancier d'essieu vertical
16- Triangle de frein
17- Roulement à rouleaux
18- Frein de vis de blocage
19- Boulon de blocage
20- Plaque de blocage
21- Adapteur de roulement à rouleaux
22- Ressort

Source: [50]

Le bogie à quatre roues a fait son apparition dès 1831 sur les chemins de fer de l'Amérique du Nord. Aujourd'hui, le bogie pivotant à quatre roues reste la norme pour presque toutes les voitures et tous les wagons classiques, sauf pour les charges très lourdes. Le système à quatre roues permet d'avoir un bogie bas, ce qui est important pour la conception des wagons.

Les deux principaux inconvénients de ce modèle sont les suivants:

a) l'usure excessive des roues et des rails qui est causée par un groupe de quatre roues fermement attachées au bogie, dans les courbes; et

b) l'instabilité qui se produit lorsque des wagons peu chargés vont à vive allure.

Le premier problème a donné lieu à la création du bogie à essieux directeurs.

En collaboration avec Railway Engineering Associates, Dominion Foundry and Steel Company et Dressor Industries, le Centre de recherche de CN Rail a mis au point un bogie autodirecteur (appelé le DR-1), qui peut aligner ses essieux en fonction du rayon de la courbe qu'il est en train de négocier [88]. Cette innovation a également porté de 50 à 80 m/h la vitesse d'instabilité pour le transport de charges légères. Les bogies actuels négocient les courbes de l'une des deux façons suivantes: a) les bogies à châssis rigide demeurent droits et sont tirés dans les courbes, et b) les bogies à parallélogrammes permettent un déplacement latéral des essieux (ce qui est une amélioration par rapport aux bogies à châssis rigide). Cependant, l'usure des roues et des rails reste un problème majeur. La figure 5.18 montre l'alignement des essieux d'un bogie à parallélogrammes en train de négocier une courbe.

Le bogie autodirecteur du CN, illustré à la figure 5.19, permet un déplacement et un pivotement des essieux. Les essieux individuels peuvent s'aligner avec le centre de la courbe de sorte qu'un essieu et ses roues sont toujours tangents à la courbe.

Ce bogie peut être installé sur l'équipement existant. Son coût plus élevé est compensé par la réduction de l'usure des roues et des rails et de la consommation de carburant (en raison de la plus faible résistance de roulement dans les courbes). Un parc de wagons-tombereaux à charbon utilise actuellement les nouveaux bogies dans l'ouest du Canada. On estime que l'usure des roues et des rails dans les courbes peut être réduite d'environ 60 % [70].

Figure 5.18

BOGIE À PARALLÉLOGRAMMES

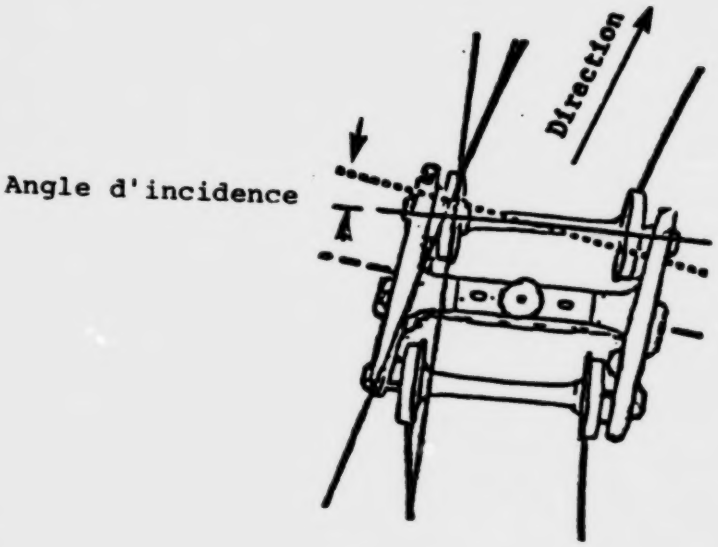
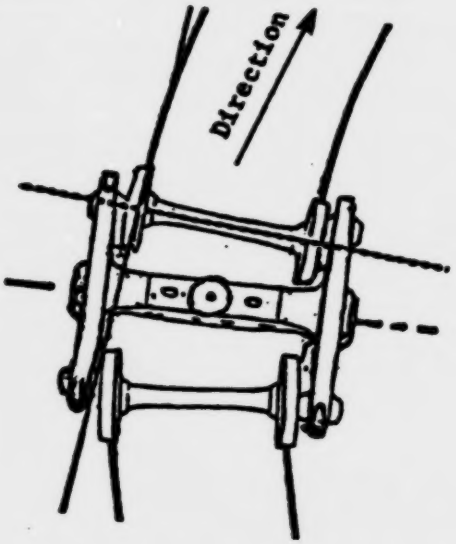


Figure 5.19

BOGIE AUTODIRECTEUR



Source: [69]

Le deuxième problème, à savoir l'instabilité des wagons à marchandises lorsqu'ils sont peu chargés, a entraîné diverses innovations. La Standard Car Truck Company a mis au point un système pour agrandir la crapaudine du bogie. La crapaudine apparaît dans la figure 5.17. Ce système d'agrandissement de la crapaudine permet de diminuer la tendance du wagon à se balancer sur le bogie. Le système est actuellement utilisé sur les wagons-tombereaux à charbon et sur les wagons plats de 89 pieds du Canadien Pacifique qui servent au service intérieur du transport de conteneurs.

Le CP a également mis au point des ressorts variables en vue de réduire l'instabilité. Dans un système à ressorts ordinaires, le wagon vide roule sur des ressorts qui sont conçus pour supporter des wagons pleins. Les efforts de balancement et de vibration causés par les ressorts rigides peuvent occasionner une défaillance rapide des composantes du wagon. Le système à ressorts variables utilise un groupe de ressorts ordinaires, dans lequel le nombre de ressorts s'accroît avec la charge. Par conséquent, lorsque la charge est légère, quelques ressorts seulement sont utilisés et le système de ressorts correspond bien à la charge qu'il doit supporter. De façon générale, la question des roues et des bogies fait l'objet de recherches constantes. L'objectif général visé par les recherches dans ce domaine consiste à réduire l'usure des rails et la fatigue du métal dans les compagnies des bogies et des wagons en réduisant la charge dynamique.

5.6 Progrès futurs

Les progrès réalisés grâce aux recherches sur les matériaux et la tendance vers des wagons à marchandises plus légers entraîneront une utilisation accrue de nouvelles substances comme l'aluminium, la fibre de verre et les matériaux tirés de la fibre du charbon pour les caisses de wagons. Bien que l'aluminium coûte de 40 à 50 % plus cher que l'acier, il possède certains avantages inhérents qui le rendent intéressant. Les économies de poids, qui sont de l'ordre de 8 000 à 12 000 livres par wagon, entraînent une économie de carburant par unité de marchandises transportées. Les wagons en aluminium ont également une longue durée de vie utile de quelque 30 ans, car ils sont très résistants à la corrosion. La valeur de rebut d'un wagon en aluminium est d'environ 12 000 $, comparativement à 2 500 $ pour un wagon en acier. Quelques 8 000 wagons en aluminium sont actuellement en service en Amérique du Nord.

La fibre de verre, les matériaux tirés de la fibre de charbon ou d'autres substances légères pourraient s'avérer utiles pour mettre au point des wagons de volume élevé pour des marchandises de faible densité. Les économies de poids de l'ordre de 40 % par rapport à un wagon en acier et une plus grande durabilité constitueront les objectifs clés de la conception des wagons [72].

Des améliorations continueront d'être apportées dans le domaine de la dynamique roue-rail, réduisant ainsi l'usure des roues et des rails ainsi que les efforts de vibration qui fatiguent les structures des wagons. Il y aura notamment une utilisation accrue des bogies à essieux directeurs et des bogies articulés pour le service de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat. Les charges par essieu se maintiendront au niveau de 60 000 livres pour de nombreuses années à venir, car des charges plus élevées nécessiteraient des modifications importantes à la structure des voies.

Le domaine du transport de conteneurs/remorques sur wagon plat connaîtra probablement des progrès techniques importants afin de réduire les coûts et d'améliorer le niveau du service pour rendre le transport ferroviaire comparable au transport routier. L'augmentation du coût de l'énergie déplacera la demande en faveur du transport de conteneurs/ remorques sur wagon plat. Les règlements seront peut-être également révisés afin de favoriser la collaboration et le développement intermodaux.

Très peu de recherches ont été effectuées dans le passé sur l'aérodynamique. Ce domaine fera probablement l'objet de progrès techniques, car il offre des possibilités d'économiser le carburant qui n'ont pas encore été pleinement exploitées.

5.7 Résumé

Au fil des années, la capacité des wagons s'est accrue pour atteindre son niveau actuel de 100 tonnes. Compte tenu des charges par essieu actuelles, il sera possible de mettre au point des wagons à quatre essieux d'une capacité de 110 tonnes en utilisant des matériaux légers et de nouvelles conceptions. On mettra davantage l'accent sur l'accroissement de la capacité volumétrique des wagons afin de rendre les marchandises de faible densité plus rentables. Les améliorations apportées aux méthodes de chargement et de déchargement ont eu pour effet de réduire à la fois le temps passé dans les terminaux et les dommages causés aux marchandises. Les systèmes de déversement à bascule et à pivotement permettent de décharger certaines marchandises en vrac dans des périodes de temps relativement courtes. Grâce à des systèmes de portes et de couvertures uniques, les marchandises peuvent être chargées et déchargées rapidement, avec peu de dommages.

Les systèmes de transport intermodaux ont réduit le temps passé dans les terminaux et les dommages causés aux marchandises. On vise maintenant à améliorer le niveau du service et le rendement énergétique. Sous ce rapport, les wagons plats articulés et les wagons-remorques constituent les progrès les plus importants. Les deux réduisent les poids à vide et améliorent l'économie de carburant. Ces techniques pourraient avoir pour effet de répartir le trafic par conteneur

et le trafic par remorque entre les wagons plats articulés et les wagons remorques. Les wagons plats actuels sont conçus pour transporter ces deux types de trafics. L'avenir de ces progrès dépendra du succès des essais en cours.

L'utilisation de bogies autodirecteurs, particulièrement sur les lignes où les courbes sont fréquentes et prononcées, permettra de réaliser d'autres économies au niveau du carburant et de l'entretien.

Chapitre 6

SYSTÈMES DE COMMANDE DE LA CIRCULATION

6.1 Introduction

Ce chapitre présente l'évolution historique des systèmes de commande de la circulation jusqu'à aujourd'hui et explique les concepts en cause.

On y examine également le système de commande de la circulation de la British Columbia Railroad afin d'illustrer le fonctionnement d'un système moderne. L'application de la commande automatique des trains et le retour des systèmes d'identification automatique des véhicules sont abordés brièvement comme techniques pouvant être mises en oeuvre à l'avenir. D'autres tendances précises dans le domaine de la commande de la circulation sont aussi présentées.

Les systèmes de commande de la circulation deviendront très importants à l'avenir comme moyens d'accroître la capacité des lignes sans effectuer d'investissements importants.

6.2 Commande centralisée de la circulation

6.2.1 Évolution générale

La commande centralisée de la circulation (CCC) permet à un nombre relativement peu élevé de régulateurs de contrôler les mouvements des trains sur un vaste territoire à partir d'un seul endroit. Le premier système de CCC au monde a été installé sur la New York Central Railroad en 1927. Il permettait de contrôler 40 milles de voies [73]. Le succès de ce système a permis une croissance et une évolution rapides de la CCC. Celle-ci offrait aux sociétés ferroviaires l'occasion d'accroître la capacité des lignes sans recourir à d'autres solutions de rechange dispendieuses comme les doubles voies. À mesure que s'est améliorée la qualité du matériel informatique, un seul centre de commande centralisée de la circulation a pu contrôler plus de 500 milles de voies.

Les moyens de communiquer avec l'équipement de détection le long des voies se sont améliorés grandement grâce à l'introduction des systèmes micro-ondes. Les territoires desservis par la CCC se sont agrandis au point où les fonctions administratives du régulateur sont devenues le facteur restrictif, et non pas ses fonctions relatives au trafic. Par conséquent, de nouveaux systèmes d'information de gestion ont

été mis en place afin d'aider les régulateurs à effectuer certaines tâches, commme constituer les équipes, recueillir l'information sur la constitution des trains et tenir à jour les registres des trains. L'informatisation visait surtout à dégager les régulateurs de certaines fonctions administratives. L'information essentielle devait être immédiatement accessible.

Le premier système informatisé de CCC a été installé pour la Union Railroad en 1966. Ce système n'exécutait que des fonctions de contrôle, d'indication et, dans une moindre mesure, d'enregistrement de l'information. Cependant, il a démontré que l'ordinateur pouvait faciliter les fonctions du régulateur en ce qui concerne l'enregistrement des données [73].

En 1972, la capacité du mini-ordinateur s'était accrue alors que son prix avait diminué considérablement. Les capacités accrues du petit ordinateur ont amené les ingénieurs à rechercher d'autres façons d'améliorer la fonction de la CCC. Une percée importante a eu lieu en 1973 avec l'installation du premier système de CCC en vidéo couleur à Greenville, en Caroline du Sud. Ce nouveau système faisait appel à des visuels semi-graphiques en vidéo couleur au lieu des tableaux conventionnels pour afficher le diagramme des voies et l'état de la circulation sur le territoire de la CCC [73].

Les centres modernes de CCC exécutent de nombreuses fonctions, notamment les suivantes: acheminement automatique à travers le réseau, exécution des rencontres et des dépassements (qui sont planifiés par le régulateur alors que l'ordinateur suit les trains et donne les signaux), et gestion des systèmes de données intégrés au logiciel de gestion. La plupart des données qui constituent les fichiers sont obtenues automatiquement grâce au logiciel de gestion industriel qui surveille l'équipement éloigné et exécute les opérations de service demandées. Ces données sont complétées par celles des régulateurs et servent de base aux rapports demandés. On fournit à la fois des rapports imprimés et des réponses aux interrogations directes de ces fichiers [73].

Le registre de train constitue le principal document utilisé par le régulateur pour planifier les déplacements des trains. Ce document est rempli en grande partie à la main par le régulateur lorsqu'il surveille le mouvement des trains et exécute la fonction de contrôle. Des données importantes concernant chaque train qui passe sur le territoire contrôlé sont enregistrées à mesure qu'elles sont connues. Les données suivantes sont notamment utilisées pour planifier la circulation: nombre de locomotives, longueur et tonnage des trains, renseignements sur les équipes, données météorologiques et conditions des voies. Les progrès des trains et les défaillances de l'équipement sont également notés afin de fournir un dossier chronologique sur la circulation et sur les problèmes opérationnels [73].

Les systèmes informatisés de CCC qui sont installés aujourd'hui fournissent des registres produits et affichés par ordinateur. La plus grande partie des données sur la circulation sont obtenues automatiquement par le système de contrôle des trains. Le régulateur introduit dans le système d'information d'autres renseignements sur les équipes et les rames. L'utilisation de formules mémorisées et des techniques de remplissage permet à la fois de simplifier l'enregistrement et de vérifier la validité des inscriptions. Comme la formule de contrôle est stockée dans la mémoire de l'ordinateur, elle peut être consultée et affichée selon les besoins, tant par le personnel de l'exploitation que par la direction [73].

Au niveau d'informatisation le plus élevé, les systèmes peuvent calculer les heures d'arrivée estimatives des trains et planifier les routes ainsi que les rencontres et les dépassements afin de réduire les retards des trains [75]. Les déplacements peuvent être contrôlés sans l'intervention constante du régulateur. Lorsque certains conflits dépassent la capacité du mode automatique, le régulateur peut prendre lui-même en charge la situation.

6.2.2 La British Columbia Railroad: une application canadienne

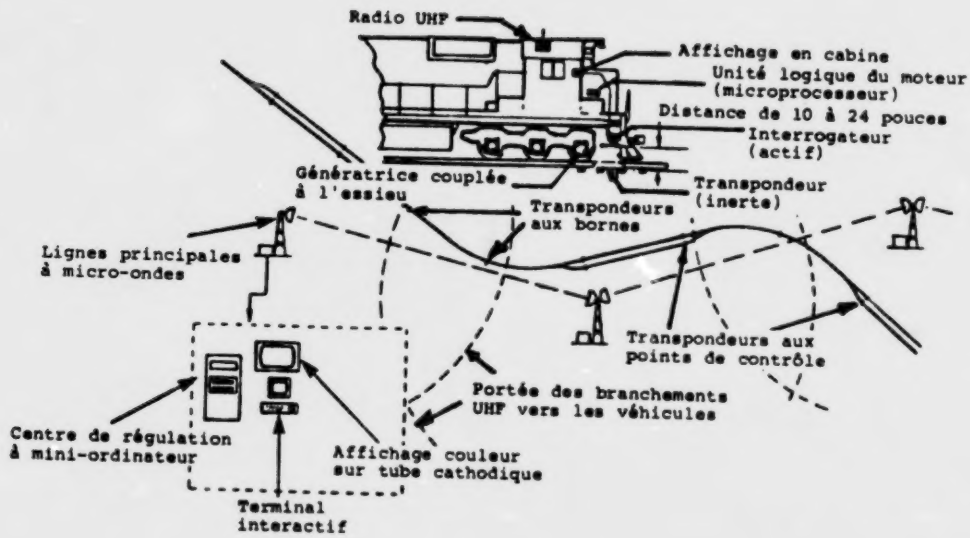
La British Columbia Railroad est en train de mettre en oeuvre une nouvelle application unique de la CCC informatisée. Système relativement peu dispendieux, il convient bien aux chemins de fer qui ont de longs bouts de lignes sans signalisation. Ce système est basé sur la séquence détection-identification-contrôle. Il est illustré de façon schématique à la figure 6.1.

Un interrogateur, installé sur la locomotive, permet de suivre le train lorsque la locomotive passe près de transpondeurs situés à certaines bornes. L'interrogateur envoie un champ d'excitation de 200 KHz, qui actionne le transpondeur inerte. Celui-ci émet à son tour des répétitions multiples de son signal d'identification propre, qui est codé de façon permanente. Le signal est capté par l'interrogateur puis transmis à l'unité logique du moteur (qui est installée dans la cabine de la locomotive). L'unité logique du moteur envoie automatiquement l'information au centre de contrôle informatisé grâce à un système de radio-communications micro-ondes/UHF, situant ainsi le train dans le réseau. Le système suit continuellement les allées et venues de chaque véhicule qui a pénétré sur le territoire contrôlé en intégrant la distance qu'il a franchie (indiquée par la génératrice couplée à l'essieu) depuis qu'il a passé le dernier transpondeur. Le mécanicien doit accuser réception de tous les messages restrictifs et vérifier en tout temps la continuité de la liaison avec le centre de contrôle. Le centre de contrôle possède donc une capacité inhérente pour ce qui est du contrôle

des trains et de la surveillance de la vitesse excessive, qui correspond directement et constamment à la situation de chaque train.

Figure 6.1

SYSTÈME DE DÉTECTION-IDENTIFICATION-CONTRÔLE



6.3 Commande automatique des trains

La commande automatique des trains (CAT) désigne tout système qui vise à aider le conducteur et à éviter les fausses manoeuvres des trains ou une interprétation erronée des signaux. Ces systèmes vont d'un simple avertisseur à l'intérieur de la cabine à la commande automatique complète des trains sans l'intervention des mécaniciens [69]. SEL Canada assure la commercialisation de l'équipement CAT mis au point par la compagnie Standard Electric Lorenz AG de l'Allemagne de l'Ouest. Le système de cette compagnie utilise des mini-ordinateurs le long des voies et des microprocesseurs à bord des

locomotives, et assure les communications bidirectionnelles constantes entre les trains et les voies, au moyen d'un câble inductif installé entre les rails [75]. La présence et l'emplacement des trains sont établis lorsque l'unité de contrôle à bord du train compte les transpositions du câble inductif et signale sa position aux ordinateurs le long des voies. L'équipement le long des voies surveille l'état des trains et en assure le contrôle en utilisant des commandes pour mettre à jour les renseignements sur les positions à l'arrêt, les vitesses maximales permises et d'autres paramètres. L'unité de contrôle à bord du train peut calculer ses propres limites de freinage et observer la performance à l'intérieur des limites imposées par l'équipement le long des voies, grâce à un affichage à l'intérieur de la cabine (avec possibilité de freinage automatique en cas de vitesse excessive) ou à une commande automatique complète du train [75]. Le système permet aux trains de rester relativement près les uns des autres, ce qui accroît la capacité des chemins de fer.

La commande automatique complète des trains a été utilisée sur les lignes de transport du minerai à Landor au Wyoming et sur la ligne du Grand Lac de l'Esclave qui est exploitée par le Canadien National. Cette dernière a une longueur de plus de 400 milles [76].

6.4 Identification automatique des véhicules

L'identification des numéros des wagons est une fonction de base qui est nécessaire pour vérifier les rames de trains aux gares de triage et d'échange dans tout le réseau. La méthode qui a été utilisée dans le passé pour accomplir cette fonction était la lecture et la vérification visuelles des numéros de wagons. Un certain nombre de techniques automatiques pour l'identification des wagons ont été récemment mises à l'essai. Par exemple, un système d'étiquettes de couleur a été largement utilisé mais a été jugé inadéquat dans le milieu des chemins de fer [77].

Les étiquettes, qui étaient constituées de bandes de couleur réfléchissantes, étaient apposées sur les faces du matériel roulant et des locomotives. À certains endroits clés le long de la ligne, des dispositifs de balayage photo-électrique lisaient les étiquettes lorsque les véhicules passaient et les transformaient en un signal électrique [78]. Le signal était alors transmis à un ordinateur central qui constituait des fichiers à jour sur les allées et venues de tous les véhicules se trouvant sur son territoire. Cependant, les étiquettes ne furent pas gardées en bon état et l'exactitude des lectures en souffrit. De plus, grâce à l'utilisation de systèmes informatiques centralisés, l'inscription manuelle des emplacements des trains et des inventaires de wagons a été accélérée, faisant ainsi paraître moins intéressantes les possibilités de l'identification automatique des véhicules

(IAV) [79]. À l'heure actuelle, l'IAV est utilisée seulement par quelques sociétés ferroviaires, mais les activités de recherche et de développement se poursuivent.

Le système d'IAV le plus perfectionné qui est actuellement à l'étude est probablement le SICARID, de la compagnie Siemens. Une antenne installée entre les rails transmet un signal à des transporteurs passifs placés dans les wagons qui passent au-dessus. Les wagons renvoient des signaux codés à un interrogateur qui transfère les signaux à un ordinateur central en vue de déterminer les progrès du train. Ce système est d'une très grande fiabilité [71].

Le Centre des systèmes de transport de General Motors est en train de mettre au point un système d'IAV qui ressemble beaucoup au système de régulation du trafic actuellement mis à l'essai sur la British Columbia Railway, sauf qu'il fonctionne à l'inverse. Les wagons transportent des transpondeurs inertes, qui sont actionnés par des interrogateurs actifs le long des voies [96]. L'information transmise par les transpondeurs est captée et décodée par l'interrogateur. Le transpondeur qui se trouve sur chaque wagon contiendra un code unique. L'identification des wagons se fera donc de la même façon que pour les systèmes déjà mentionnés.

6.5 Tendances futures

Dans le domaine de la commande centralisée de la circulation, les tendances peuvent se résumer comme suit:

a) l'ordinateur jouera un rôle de plus en plus important, en particulier dans le domaine des communications et du travail de bureau, ce qui permettra au régulateur de se concentrer sur la régulation des trains;

b) la commande au toucher sera de plus en plus utilisée. Au lieu de transmettre ses instructions au moyen d'un clavier, le régulateur touchera un point sur un écran ou un visuel. Cette façon de procéder accélérera encore davantage les opérations de régulation;

c) les possibilités accrues de déterminer la vitesse des trains de manière à effectuer des rencontres avec le minimum d'immobilisation (par exemple, avec un train sur une voie d'évitement) devraient accroître la capacité des chemins de fer, réduire les exigences relatives au freinage et à l'accélération, et par conséquent économiser de l'argent au niveau de l'entretien et du carburant [75]; et

d) les liaisons avec d'autres services informatisés seront utilisées pour obtenir automatiquement presque toutes les données dont a besoin un régulateur pour remplir ses fonctions. Ces liaisons élimineront l'obligation, pour chaque usager, d'introduire à nouveau les données requises en les transmettant automatiquement au prochain usager. Les liaisons avec d'autres ordinateurs de CCC, des ordinateurs de triage, des ordinateurs de répartition des équipes et des systèmes de contrôle centralisés plus importants lui permettront de contrôler et de surveiller presque tous les aspects du fonctionnement des trains.

Les systèmes de CCC, en particulier ceux qui sont conçus pour aider les conducteurs, devraient être perfectionnés encore davantage dans un proche avenir. Des trains entièrement automatisés sans conducteur pourront être utilisés pour les services privés ou les services captifs dans les régions peu peuplées. Dans la plupart des cas, un mécanicien sera encore nécessaire en raison des exigences des syndicats, de certains facteurs externes comme les mécanismes de commutation gelés, les exigences relatives à la sécurité ou d'autres circonstances imprévisibles.

Afin de pouvoir suivre les 2 000 000 de wagons et de locomotives de l'Amérique du Nord, un système d'IAV amélioré sera probablement mis en oeuvre. Une composante active à bord du wagon ou une forme quelconque de connexion électrique entre les wagons et la locomotive constituerait une étape importante pour améliorer les fonctions de surveillance des wagons, qui comportent la détection des défectuosités et la manipulation des trains [72].

6.6 Résumé

L'introduction des ordinateurs et des microprocesseurs a amélioré l'efficacité des systèmes de régulation du trafic, en particulier dans le domaine de la commande centralisée de la circulation. Il est maintenant possible de surveiller des territoires plus vastes à partir d'un bureau central, ce qui a pour effet d'accroître la capacité des lignes existantes. Grâce à la commande automatique des trains, il est possible de respecter les exigences relatives à l'accélération et au freinage, sans entraîner une perte de carburant ou une usure des freins excessive, réduisant ainsi les coûts de fonctionnement. Le travail administratif peut être effectué de façon plus efficace en utilisant des systèmes de gestion d'information par ordinateur. L'identification automatique des véhicules, qui a disparu du service au cours des cinq dernières années, devrait reparaître sous une forme plus perfectionnée.

Chapitre 7

GARES DE TRIAGE

7.1 Introduction

Ce chapitre présente l'historique des gares de triage, depuis les premières gares à butte construites en 1880 jusqu'aux gares informatisées d'aujourd'hui. On y explique les composantes et le fonctionnement d'une gare de triage moderne, notamment le faisceau de réception, la voie de butte, le bassin du faisceau de triage, le faisceau de départ et le faisceau de soutien. Sont également abordées les applications de l'ordinateur et quelques innovations étrangères dans le domaine du matériel, suivies d'un bref exposé des tendances futures.

7.2 Évolution

La gare de triage est l'endroit où les wagons ou groupes de wagons sont triés et formés en trains avant d'être expédiés sur la ligne principale. Les gares de triage de chemins de fer sont habituellement situées dans des centres de transport importants mais certaines se trouvent dans des régions peu peuplées. Les gares les plus efficaces d'aujourd'hui sont celles qui fonctionnent selon le système par gravité ou par "bosse". Une gare de forte capacité peut traiter quelque 6 000 wagons par jour.

Dès les années 1880, on introduisait les buttes artificielles ou bosses, à partir desquelles les wagons pouvaient descendre jusqu'à leurs voies d'évitement respectives [78]. Auparavant, les gares étaient situées sur terrain plat et le déplacement des wagons nécessitait beaucoup de puissance. Dans une gare de triage à butte, le train monte une petite pente et les wagons sont dételés au sommet de la butte puis roulent librement de l'autre côté. Grâce à l'aiguillage, les wagons peuvent être dirigés vers une voie d'évitement prédéterminée. L'attelage s'y fait automatiquement lorsque le wagon frappe les wagons qui sont déjà sur la voie d'évitement (le premier wagon qui descend la butte s'attelle à la locomotive).

Avant l'invention du frein de voie, la vitesse des wagons lors des descentes était contrôlée par des hommes qui étaient à bord des wagons et appliquaient les freins à main. La percée technologique qui a accéléré la mécanisation complète a été l'invention du frein de voie. Mis au point aux États-Unis peu après la Première Guerre mondiale, ce système faisait appel

à un frein installé à un endroit fixe sur les rails, et non sur le wagon. Le frein de voie était manié par un serre-freins qui était posté le long de la voie. Il fallait donc moins d'hommes pour contrôler la vitesse des wagons. Bien que le frein de voie ait amélioré l'efficacité des gares de triage, l'intervention de l'homme était encore nécessaire pour ajuster la vitesse du wagon qui approchait grâce à une application appropriée des freins. Des manoeuvres abruptes ont fréquemment causé des dommages aux extrémités des wagons. Le contrôle pleinement automatisé des freins de voie a représenté la prochaine innovation importante dans le domaine des dispositifs de freinage pour manoeuvrer les wagons dans la gare. Ce dispositif, complété par des boutons de contrôle pour la sélection des voies, a été utilisé pour la première fois dans les années 1950. Dans un système automatique, un ordinateur analogique était utilisé pour choisir la vitesse des wagons en fonction de leur performance [76].

Plusieurs types de freins de voie sont actuellement en usage. Les freins Eddy utilisent des forces électrodynamiques pour ralentir un wagon lorsqu'il passe dans le champ électrique créé par le frein. Les freins à plongeurs ralentissent les wagons à une vitesse prédéterminée en forçant les roues à comprimer une série de plongeurs pneumatiques. La force exercée par les plongeurs dépend directement de la vitesse à laquelle la roue les frappe. Un troisième système qui est utilisé dans certaines gares de triage européennes utilisent un frein de voie à vis. Lorsque les roues passent le long de la vis, elles forcent celle-ci à tourner. Une force de ralentissement est exercée par un amortisseur hydraulique qui résiste à la rotation de la vis.

Les premiers systèmes de contrôle numérique par ordinateur ont fait leur apparition au milieu des années 1960. Au début, les systèmes assuraient le contrôle du triage et commandaient les forces des freins de voie de manière à fournir la bonne vitesse de sortie des wagons. Par la suite, des ordinateurs ont été utilisés pour tenir un inventaire permanent du nombre et du type de wagons attelés à chaque train. Les systèmes automatiques d'ordonnancement des wagons, par exemple, ont réduit de 18 à 12 heures la durée des séjours des wagons dans les terminaux [79]. Avec ces systèmes, les messages relatifs aux déplacements des wagons sont acheminés aux gares, aux gares de triage et aux terminaux. Ces messages comportent notamment des renseignements préliminaires sur la composition des trains, la répartition des wagons, ainsi que des instructions spéciales qui accéléreront le triage.

7.3 Gares de triage modernes

Les progrès réalisés dans le domaine de l'informatique et du processus industriel pour faire correspondre l'ordinateur et le matériel dans la gare de triage ont abouti à la création de gares de triage automatiques. Le système de contrôle d'une

gare de triage comporte normalement les fonctions suivantes [80],[94]:

a) circulation sûre et expéditive des wagons;

b) réduction du temps passé dans les terminaux pour les wagons et les locomotives;

c) meilleure utilisation des ressources (machines, équipes, personnel administratif); et

d) renseignements à jour et exacts sur les manifestes des marchandises.

Bien que la disposition puisse varier, une gare de triage moderne comprend généralement les grandes composantes suivantes:

a) Le faisceau de réception, qui comprend normalement 10 voies. Il peut inclure une voie pour les wagons qui ne sont pas destinés au triage.

b) La voie de butte est généralement équipée d'une bascule qui peut peser des objets en mouvement et d'un frein de voie principal sur la pente descendante.

c) Le bassin du faisceau de triage, qui peut comprendre jusqu'à 60 voies, est l'endroit où les trains sont formés. Il inclut habituellement des freins de voie secondaires qui sont situés sur les voies reliant la voie de butte principale aux voies de triage.

d) Le faisceau de départ peut contenir jusqu'à 10 voies. Il est habituellement utilisé pour la formation et l'inspection finales des trains.

e) Le faisceau auxiliaire est utilisé pour le surplus des voies du bassin et contient des wagons locaux et industriels. Il peut comporter des installations pour le transport de conteneurs/ remorques sur wagon plat.

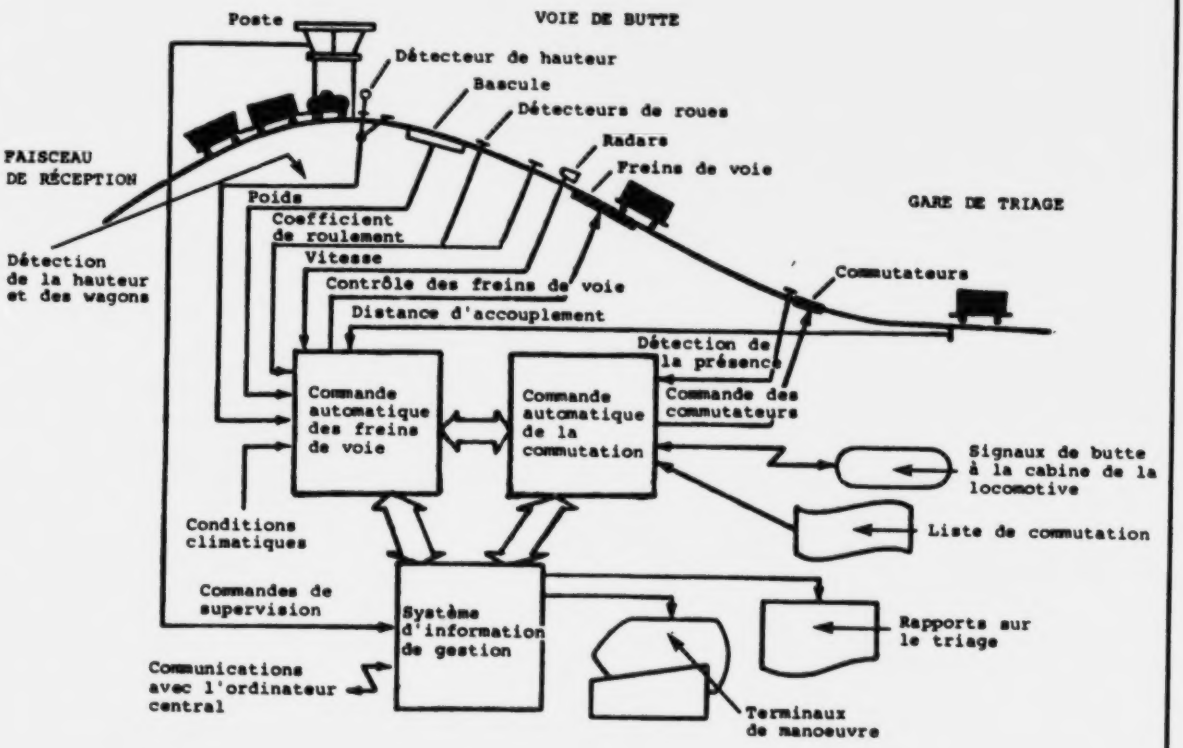
f) L'atelier de réparation des wagons sert à réparer les wagons et à ajuster les marchandises.

g) L'atelier de réparation des locomotives est utilisé pour assurer l'entretien des machines.

La figure 7.1 illustre le fonctionnement d'une gare de triage automatisée à butte.

Figure 7.1

GARE DE TRIAGE AUTOMATISÉE À BUTTE



Source: [82]

Le wagon est amené au sommet de la butte, y est dételé et descend librement la pente. Le wagon passe sur la bascule électronique et son poids est communiqué à l'ordinateur. À mesure que le wagon avance, un détecteur de roues indique que le wagon s'approche du frein de voie et du radar à effet Doppler. L'ordinateur se sert de ces données et du poids indiqué pour ajuster le frein de voie selon la force de freinage nécessaire pour assurer une vitesse de sortie appropriée. Le wagon est alors aiguillé sur la bonne voie. Des détecteurs et des freins de voie supplémentaires ralentissent le wagon à une vitesse d'attelage appropriée de 3 à 4 m/h, lorsqu'il frappe le wagon précédent du train [81].

7.4 Innovations européennes et japonaises

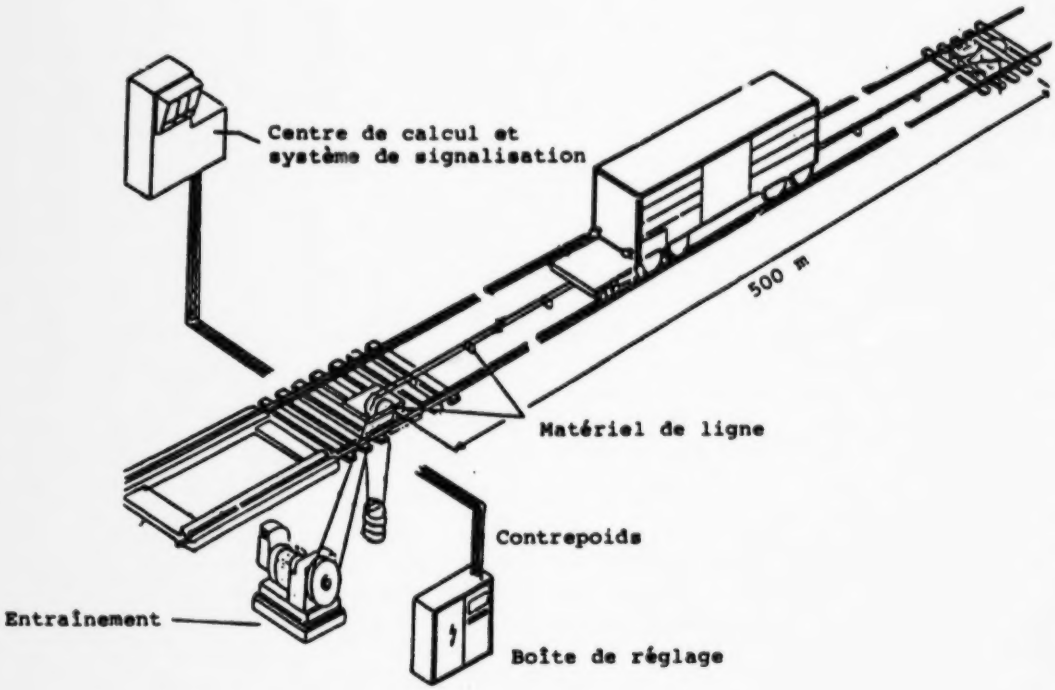
Certaines conceptions innovatrices ont été mises au point en Europe pour les gares de triage automatisées à butte. À Bâle en Suisse, la voie du faisceau de réception est sur un plan incliné et les freins de voie sont utilisés pour retenir les trains sur la pente. Aucune locomotive n'est nécessaire pour pousser le train au sommet de la butte. Lorsque les wagons sont dételés, ils passent sur un frein de voie secondaire et pénètrent dans le bassin de triage. Ici, les déplacements du wagon sont contrôlés par un tracteur, tel qu'illustré à la figure 7.2. Les tracteurs sont de petits wagons de remorquage qui circulent entre les rails de chaque voie de triage. Un wagon peut passer par-dessus le tracteur sans y toucher mais, lorsqu'il doit être tiré ou freiné, une série de rouleaux sortent du tracteur et s'engagent contre le périmètre du boudin des roues du wagon. Un câble tiré par un moteur électrique situé sous la voie contrôle alors les déplacements du tracteur et du wagon [83].

Un système semblable, avec quelques modifications, est actuellement commercialisé par la compagnie allemande Hermann Vollert AG Machinenfabric. Dans ce système, le tracteur roule sur une voie étroite distincte à l'intérieur de la voie normale du train. Le tracteur comporte des rouleaux qui, lorsqu'ils sont étirés de chaque côté, touchent le boudin des roues du wagon, entraînant celui-ci.

La gare de triage Shiohama de Kawasaki au Japon utilise un système semblable aux systèmes européens, mais comporte des tracteurs autopropulsés pour déplacer les wagons dans la gare de triage. Il s'agit essentiellement d'une gare à butte qui comprend des freins de voie primaires et secondaires. La gare est située près de la mer et est exposée à des vents violents qui influent grandement sur la vitesse des wagons. Les tracteurs autopropulsés circulent sur des voies étroites distinctes et sont entraînés par des moteurs à induction linéaire qui assurent un contrôle positif précis de la vitesse des wagons. Les tracteurs prennent les wagons à une extrémité de la gare et les tirent à une vitesse de 8 à 9 m/h jusqu'à une

Figure 7.2

SYSTÈME DE TRACTEUR À CORDES



Source: [83]

distance prédéterminée du groupe de wagons formant le train. Le tracteur ralentit, puis relâche le wagon à sa vitesse d'attelage appropriée. Le tracteur retourne alors à l'autre extrémité de la gare à une vitesse plus grande jusqu'à ce qu'il prenne un autre wagon et répète le processus [83].

Le système japonais offre notamment les avantages suivants:

a) La vitesse la plus élevée pour le contrôle des trains, parmi tous les systèmes qui ont été mis au point jusqu'à maintenant; le triage prend donc moins de temps.

b) La possibilité d'accélérer et de ralentir, une fois que le wagon a dépassé les freins de voie secondaires; cet avantage permet de réduire l'influence de certains facteurs gênants, comme les vents violents, et certaines caractéristiques défavorables concernant le roulement des wagons.

c) Des programmes de fonctionnement automatiques sont intégrés dans les unités de contrôle de la vitesse; le système de contrôle central est ainsi déchargé de certaines fonctions.

d) Le poids relativement léger des dispositifs de contrôle de la vitesse; ceux-ci peuvent exercer des forces d'entraînement et de freinage puissantes, en raison de l'utilisation du moteur à induction linéaire.

7.5 Tendances futures

On prévoit les tendances à court terme suivantes pour les gares de triage:

a) La tendance vers une intégration complète du processus de contrôle des wagons se maintiendra. On mettra l'accent sur le processus industriel qui fait correspondre l'ordinateur et le matériel dans la gare de triage.

b) Les dispositifs de mesure de la vitesse d'attelage seront améliorés. Il en résultera des systèmes de contrôle dynamiques qui peuvent se rectifier d'eux-mêmes [81].

c) Les composantes ordinaires des gares (faisceau de réception, faisceau de triage, etc.) demeureront inchangées.

d) On cherchera davantage à améliorer les anciennes gares plutôt qu'à en construire de nouvelles.

e) L'efficacité des gares s'accroissant, on tentera peut-être de réduire le nombre de gares en service et de s'assurer que celles qui demeurent sont bien situées.

f) La main-d'oeuvre nécessaire pour le triage diminuera en raison de l'automatisation. Il y aura notamment certaines innovations, comme l'accouplement automatique des conduites des freins, ce qui éliminera cette activité à forte main-d'oeuvre. Il est possible qu'on utilise également des locomotives de manoeuvre télécommandées.

7.6 Résumé

L'amélioration des systèmes de contrôle mécaniques ainsi que l'avènement de l'ordinateur ont augmenté le nombre de trains qui peuvent être traités dans les gares de triage. Des techniques comme le frein de voie ont réduit le nombre d'employés nécessaires tout en fournissant une certaine interface avec les ordinateurs. L'utilisation des ordinateurs a apporté certains avantages, notamment la réduction du temps passé dans les terminaux (ce qui a permis de réaliser des économies de carburant et d'autres ressources) et des renseignements opportuns pour les fins de la gestion et de l'administration. Des pays étrangers ont mis au point des systèmes qui comportent des tracteurs à cordes ou autopropulsés, lesquels assurent un meilleur contrôle de la vitesse des wagons durant le processus d'accouplement dans la gare de triage.

Chapitre 8

VOIES FERRÉES ET ÉQUIPEMENT D'ENTRETIEN

8.1 Introduction

Le présent chapitre expose l'historique et l'évolution future des voies ferrées. On y examine certains sujets comme l'électrification des voies, les perfectionnements des rails, l'équipement d'entretien, les traverses de béton, les longs rails soudés et l'utilisation de géotextiles pour les plates-formes. L'évolution future prévue est traitée dans chaque partie. Le domaine qui fait l'objet des progrès techniques les plus rapides est celui de l'équipement d'entretien. Les sociétés ferroviaires du Canada sont les chefs de file dans ce domaine. Elles sont en train de mettre à l'essai des machines capables d'exécuter six fonctions de maintenance différentes en une seule opération.

8.2 Historique

La grande époque de l'expansion du chemin de fer a pris fin avec l'effondrement du marché en 1929. S'ajoutant à la dépression subséquente, une sécheresse a affligé les Prairies, réduisant encore plus les besoins d'expansion. On a quand même procédé à la construction de voies isolées: une en direction de Port Churchill; d'autres en direction des mines, dont la Quebec North Shore and Labrador Railway, de Sept-Îles à Schefferville; on a aussi prolongé vers le Nord la voie de la compagnie Northern Alberta et celle de la Pacific Great Eastern.

De 1945 à 1978, le réseau des voies principales de premier niveau est passé de 42 352 milles à 42 185 milles, soit une diminution de 0,4 %. On envisage présentement l'abandon de plusieurs voies secondaires dans les Prairies, puisqu'il est relativement facile de transporter le blé aux élévateurs par les voies principales.

Si l'on tient compte des voies principales de deuxième, de troisième et d'autres niveaux, des voies d'usine, de garage et d'évitement, le réseau total est de 36 % plus étendu que ce qui a été dit plus haut. Le tableau 8.1 compare la longueur du réseau de 1945 à 1978. La ventilation de toutes les voies figurant au tableau 8.1 indique ce qui suit:

70,0 % sont constitués de voies principales de premier niveau.

Tableau 8.1

LONGUEUR DU RÉSEAU EXPLOITÉ AU CANADA, 1945-1978

Année	Longueur totale	Voies principales, niveau 1
1945	56 937	42 352
1946	57 005	42 335
1947	50 051	42 322
1948	57 005	42 248
1949	57 834	42 978
1950	57 997	42 978
1951	58 150	42 956
1952	58 921	42 953
1953	58 695	43 163
1954	58 760	43 132
1955	59 316	43 444
1956	59 830	44 769
1957	59 097	44 839
1958	59 319	45 164
1959	60 293	44 209
1960	59 913	44 029
1961	58 783	43 689
1962	58 759	42 654
1963	58 511	42 623
1964	58 243	43 355
1965	48 202	43 157
1966	58 100	43 003
1967	58 530	43 168
1968	58 658	43 168
1969	59 115	43 613
1970	59 628	43 983
1971	59 710	44 153
1972	60 037	44 024
1973	60 246	44 232
1974	60 247	44 266
1975	60 045	43 941
1976	59 850	43 789
1977	59 022	43 476
1978	58 462	42 185

3,0 % sont constitués de voies principales de deuxième niveau (deuxième voie d'une voie double).

0,1 % est constitué de voies principales de troisième niveau (troisième voie d'une voie triple).

6,0 % sont constitués de voies d'usine.

20,0 % sont constitués de voies de garage et d'évitement.

8.3 Voies électrifiés

Il existe peu de voies électrifiées au Canada. Il y a notamment la ligne à courant continu du CN qui traverse le tunnel du Mont-Royal à Montréal, une autre en Colombie-Britannique, affectée essentiellement au transport interurbain de passagers, et celle d'une longueur approximative de 7 milles, qui sert au transport automatisé du minerai à Sept-Îles, au Québec. Au cours des années écoulées, l'exploitation de voies électrifiées au Canada a diminué ou n'a guère varié, ainsi que l'indique le nombre de locomotives électriques en service (voir la figure 2.1). Des plans ont été établis en vue d'électrifier une section de la ligne de transport du minerai dans le nord du Québec sur la Cartierville Railway. Il pourra s'agir d'un projet pilote pour une électrification plus poussée au Canada.

La seule ligne électrifiée qui fonctionne à 50 kV et 60 Hz (normes commerciales) servant au transport de marchandises en Amérique du Nord est celle du Black Mesa and Lake Powell Railroad, en Arizona. Cette voie d'une longueur de 78 milles n'est utilisée que par un seul train qui transporte du charbon et effectue jusqu'à trois voyages aller et retour par jour. Il y a toutefois, aux États-Unis, des lignes électrifiées qui servent surtout au transport de passagers, par exemple dans le couloir New Haven - Baltimore.

8.4 Rails

Au début des années 1800, on utilisait habituellement des rails en fer forgé. Ils étaient souvent étendus directement sur le sol ou parfois sur des blocs de pierre. Vers la fin des années 1870, on commença à remplacer les rails en fer forgé par des rails en acier, ayant une plus grande force et supportant mieux l'usure. La taille typique des rails a augmenté de façon régulière, passant d'une profondeur de 4 pouces et d'un poids de 32 livres la verge à une profondeur de 6 ½ pouces et un poids de 132 livres la verge. À l'heure actuelle, la taille maximale des rails est de l'ordre de 8 pouces de profondeur et d'un poids de 150 livres la verge [78]. La plupart des nouveaux rails qui sont installés au Canada pèsent 132 livres la verge.

La plupart des nouveaux rails sont actuellement faits d'acier au carbone, ayant subi un traitement thermique. À l'avenir, l'acier au carbone sera probablement remplacé par de l'acier allié. On estime que certains alliages contenant du chrome, du manganèse, du colombium ou du vanadium ont amélioré la force des rails et leur résistance à l'usure, par rapport aux rails en acier au carbone [84]. La tendance vers des rails plus lourds et plus forts reflète l'accroissement de la charge moyenne par essieu et l'augmentation de la circulation sur la plupart des lignes. À mesure que la circulation augmente, le temps dont disposent les équipes d'entretien pour s'occuper de la ligne diminue. L'utilisation de rails de première qualité de même qu'un bon ballast et de bonnes traverses a eu pour effet de porter de 3 à 6 ou 7 ans l'intervalle entre le remplacement des rails sur les lignes à circulation dense. Au Canada, il est maintenant courant de déposer de longs rails soudés de 1 400 pieds ainsi que des traverses de béton pour les nouvelles installations, surtout là où les pentes prononcées sont nombreuses et où la circulation est dense [72]. Afin de réduire les contraintes thermiques produites sur un rail soudé, on utilise des techniques de chauffage ou de refroidissement durant l'installation; autrement dit, avant d'installer de façon permanente le rail, celui-ci est chauffé ou refroidi à la température moyenne de la région en question [78]. Ce processus permet de réduire les contraintes thermiques maximales qui sont attribuables aux variations de la température ambiante.

8.5 Équipement d'entretien

À mesure que la circulation s'accroît sur une ligne, le temps disponible entre le passage des trains pour l'entretien des voies sur une seule ligne diminue. L'équipement d'entretien qui circule sur la voie doit arriver sur place, exécuter les travaux d'entretien et retourner à la voie d'évitement durant la période qui s'écoule entre le passage de deux trains. Les innovations apportées à l'équipement d'entretien visent à réduire les exigences relatives à la main-d'oeuvre tout en accélérant et en combinant plusieurs fonctions d'entretien en une seule opération. La machine la plus moderne est le Canron P811 pour le remplacement des rails et des traverses de béton, dont se servent le CN et le CP. Il s'agit d'un genre de convoyeur qui, en une seule série d'opérations, soulève l'ancienne voie, enlève le rail et les traverses, nettoie le ballast, dépose et espace les nouvelles traverses de béton, et y attache les nouveaux rails soudés de 1 400 pieds. La machine peut franchir une distance de 2 000 pieds par heure. Les économies de coûts pour le remplacement des rails sont évaluées jusqu'à 3 000 000 $ par année [84]. En faisant effectuer six opérations à une seule machine, ce nouveau système élimine le travail segmenté, la faible vitesse des petites machines et les importantes équipes de travail qui sont nécessaires pour le remplacement des rails.

La fréquence de plus en plus grande des trains lourds et le coût croissant du ballast (pierre concassée qui transmet les forces des traverses à la sous-couche) ont accentué l'importance des machines d'entretien du ballast. Depuis huit ans, CP Rail utilise, pour nettoyer le ballast, une machine qu'il loue de la compagnie Kershaw Manufacturing de l'Alabama [85]. Le ballast qui se trouve le long et en dessous des rails, et entre ceux-ci, est chargé sur un convoyeur puis transporté à un épurateur, qui enlève les déchets. Une fois nettoyé, le ballast est retourné sur la voie et les déchets sont jetés le long de la voie (voir la figure 8.1). Au cours de l'opération, les employés remplacent les traverses usées. La vitesse de travail est de l'ordre de 1 500 à 1 600 pieds par jour.

Une fois que le ballast a été nettoyé et que du ballast supplémentaire a été ajouté à partir d'un train de travail, il doit être bourré afin d'accroître la stabilité. On prévoit, pour un proche avenir, des progrès techniques qui accroîtront la vitesse des bourreuses automatiques. Dans le passé, il s'agissait d'une opération manuelle. Les bourreuses automatiques actuelles fonctionnent à une vitesse d'environ 2 400 pieds par heure. Le CP met actuellement à l'essai un prototype fabriqué par la compagnie Canron, et espère atteindre une vitesse de 3 m/h.

L'équipement d'entretien des voies connaîtra les progrès suivants dans un proche avenir:

a) des cramponneuses plus rapides et plus fiables;

b) un meilleur poste de soudure mobile pour les rails soudés, pouvant rouler sur route ou sur rail;

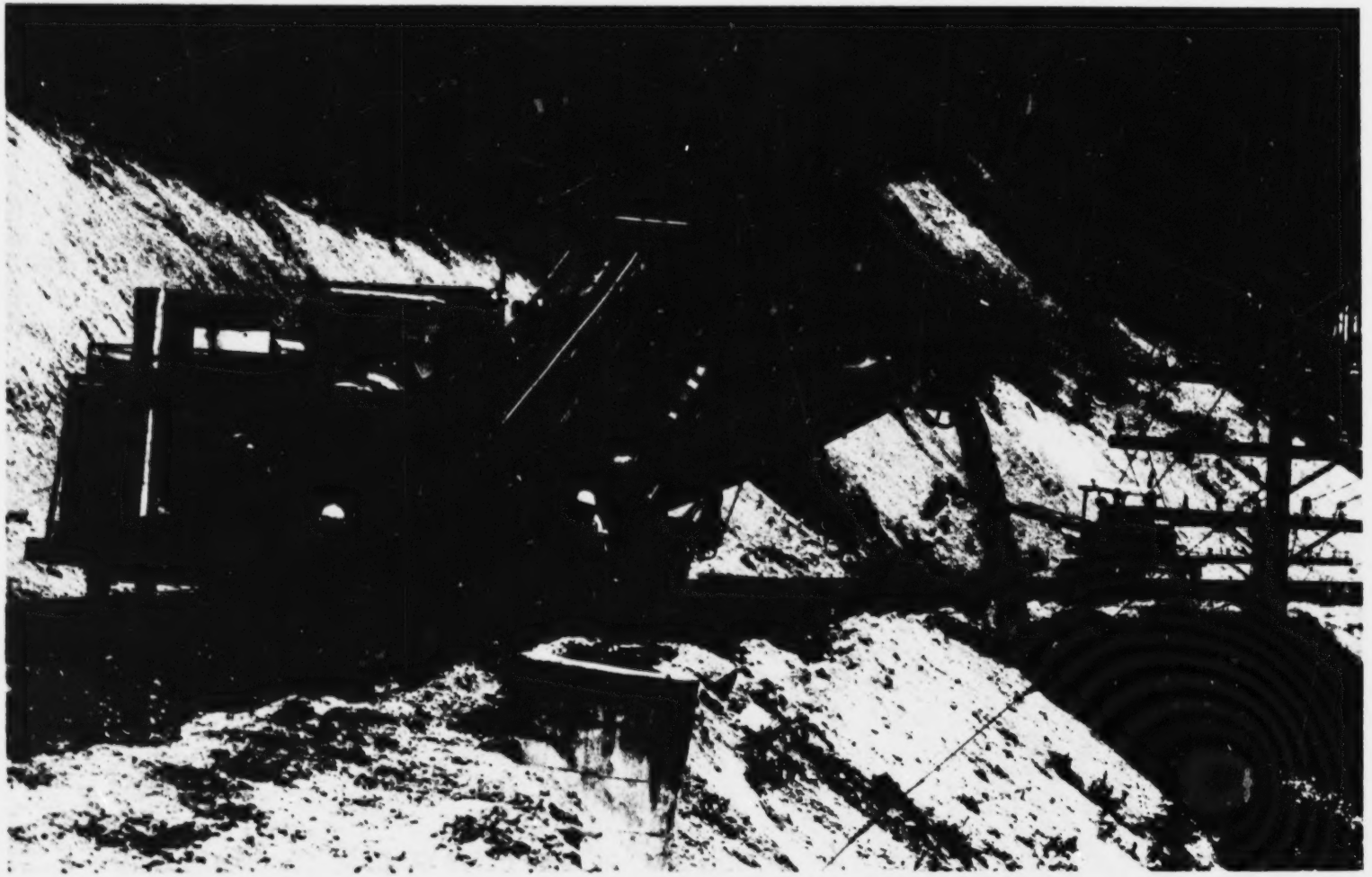
c) une utilisation accrue des meuleuses à rails pour refaire la surface des rails, réduisant ainsi le nombre des changements de rails dans les courbes à circulation dense; et

d) l'utilisation, pour l'entretien périodique, d'équipement qui n'occupe pas le rail.

À l'avenir, l'équipement d'entretien des voies évoluera probablement suivant deux catégories. Les énormes unités à fonctions multiples, du genre de la machine Canron P811, effectueront les grands travaux de reconstruction. L'équipement portatif plus petit, à une seule fonction, et pouvant circuler sur rail et sur route, servira à effectuer les réparations périodiques entre les grandes révisions. Ces petites unités seront en mesure de dégager rapidement la voie aux passages à niveau, sans nuire à l'horaire des trains.

De façon générale, les améliorations apportées à l'équipement d'entretien viseront à accroître la rapidité des

Figure 8.1
DÉGARNISSEUSE À BALLAST



Source: [85]

travaux, à réduire les exigences relatives à la main-d'oeuvre, à simplifier l'équipement d'entretien et à améliorer sa fiabilité.

D'autres machines seront également utilisées pour la détection et l'évaluation des défectuosités sur les rails. On utilise depuis les années 1960 des wagons pour mesurer la configuration des rails. Ces machines servent à mesurer certains paramètres, comme le rayon de courbure des rails, le surhaussement et toute irrégularité de l'alignement horizontal et vertical. Les calculs de ce genre sont utiles pour déterminer quantitativement si la structure des rails a conservé son intégrité géométrique, ce qui est évidemment essentiel pour assurer un fonctionnement sûr des trains.

Des machines à mesurer l'usure des rails ont récemment fait leur apparition. Elles circulent sur les rails à des vitesses de 10 à 20 m/h. La Southern Railway des États-Unis utilise une machine de ce genre et obtient ainsi un état permanent de la configuration des rails [86]. Si on découvre qu'un rail contient des ondulations inacceptables, on peut alors utiliser des meuleuses pour éliminer les irrégularités plutôt que de remplacer le rail [84].

8.6 Traverses de béton

Les traverses de bois constituent la norme pour les rails depuis qu'elles ont été introduites en Angleterre au début des années 1800 par George Stephenson, considéré comme l'inventeur du chemin de fer moderne [78]. Vers la fin des années 1950, on a tenté des expériences avec des traverses de béton précontraint. Les premières traverses de béton en Amérique du Nord ont été installées il y a environ 20 ans sur l'Atlantic Coast Line en Floride [87]. Les opinions divergent quant à leur performance et leur mise en oeuvre généralisée ne s'est pas encore produite. Le CN s'en sert dans sa région des Montagnes (qui connaît des températures très inclémentes et des courbes très prononcées) sur la sous-division Ashcroft de 125 milles.

On prévoit néanmoins une utilisation accrue des traverses de béton, en raison des avantages suivants qu'elles offrent:

a) elles ont une durée de vie utile de 50 ans, comparativement à 25 ou 30 ans pour les traverses de bois;

b) les frais d'entretien sont réduits de 30 %;

c) le rendement énergétique est amélioré; et

d) les traverses de bois coûtent de plus en plus cher [88].

Une étude récente, qui a été effectuée par le service des essais du ministère des Transports des États-Unis près de Pueblo au Colorado [89], a permis de déterminer que les domaines suivants nécessitaient des recherches supplémentaires pour le perfectionnement des traverses de béton:

a) élaboration de critères pour les spécifications concernant la qualité du ballast, la consolidation du ballast et (ou) les limites de vitesse afin d'assurer une circulation sûre après l'entretien du ballast;

b) effets des méthodes d'entretien sur la compacité du ballast;

c) prévention des dommages causés aux traverses et aux attaches durant les travaux d'entretien courants; et

d) amélioration de certaines attaches en vue d'accroître la résistance à la fatigue et de réduire le glissement des rails et le déplacement des traverses [89].

8.7 Rail à base continue

Ici, le rail est attaché directement à une dalle de béton renforcée et continue. Cette base de béton remplace le ballast et les traverses classiques. Des sections d'essai pour ce genre de structures ont été construites en Angleterre, en Italie, en Espagne et au Japon [90].

Les avantages qu'on prévoit tirer de l'utilisation du rail à base continue peuvent se résumer comme suit:

a) la section transversale est simple et peu élevée, ce qui devrait réduire les coûts de construction, en particulier dans les tunnels;

b) l'utilisation de béton devrait réduire les frais d'entretien dans les courbes, dans les tunnels et dans les autres endroits où les travaux d'entretien sont difficiles à exécuter; et

c) ce système devrait réduire le déplacement des rails dans les courbes, permettant ainsi d'accroître les limites de vitesse.

Une étude effectuée au Japon a révélé que la configuration des voies souffrait du manque de précision lors de l'installation des rails sur le béton [90]. Le rail à base continue pourrait faire l'objet d'une application limitée en Amérique du Nord si les essais effectués à l'étranger donnent de bons résultats.

8.8 Géotextiles

Les géotextiles sont des tapis de fibres de polyester ou de polypropylène qui sont étendus sur la couche de terre naturelle ou la sous-couche de ballast sur l'infrastructure. Ils visent à réduire l'affaiblissement de l'infrastructure par l'érosion. Les défectuosités de l'infrastructure, qui peuvent causer des déraillements, sont presque toujours causées par de fortes concentrations d'eau. Pour contrecarrer ce phénomène, les tapis font fonction de mèches qui stoppent le mouvement ascendant de l'eau et poussent celle-ci vers les côtés de l'infrastructure. Les fibres empêchent également la migration des particules du sol dans le ballast par suite de l'effet de pompage des trains qui passent. Le nettoyage du ballast d'une section qui a été foulée et affaiblie par la pénétration de petites particules de sol constitue une opération dispendieuse. Le pompage qui est causé par les trains lourds a également pour effet d'attirer l'eau dans le ballast en passant par la sous-couche [91]. Les tapis de fibres arrêtent ce processus et le pompage peut même aider à pousser l'eau sur les côtés. Les géotextiles contribuent également à la stabilité en répartissant les charges sur une sous-couche plus large.

Utilisés pour la première fois en Amérique du Nord au milieu des années 1970, les géotextiles représentent une solution relativement peu dispendieuse à bon nombre de problèmes de drainage sur de courtes distances d'infrastructures. Leur utilisation devrait s'accroître à l'avenir.

8.9 Résumé

Depuis 1945, la longueur du réseau de voies de lignes principales de niveau 1 a très peu varié. D'une longueur de 42 352 milles en 1945, les voies principales de niveau 1 ont atteint leur longueur maximale de 43 941 milles en 1975 et ont diminué légèrement depuis.

Les voies sont électrifiées pour les installations suivantes: service de passagers d'environ 300 milles dans le corridor nord-est entre New Haven et Baltimore; ligne privée de 78 milles pour le transport du charbon en Arizona; et ligne automatisée de 7 milles pour le transport du minerai à Sept-Îles au Québec. Des plans ont été établis pour électrifier une partie de la voie de transport de minerai dans le nord du Québec et pour surveiller son fonctionnement, à titre de projet pilote pour l'électrification des voies.

Les recherches sur les matériaux ont permis de mettre au point de nouveaux alliages d'acier qui résistent mieux à l'usure et qui sont plus forts, en vue de remplacer l'acier au carbone. La plupart des nouveaux rails pèsent maintenant 132 livres la verge; ils sont soudés et mesurent 1 400 pieds. L'illustration de ce rail lourd réduit la fréquence des

remplacements de rails, là où la circulation est dense et où les charges par essieu sont lourdes.

L'équipement d'entretien des voies évoluera probablement selon deux types. Des machines énormes, capables de remplacer les anciennes voies par de nouvelles en une seule opération, seront utilisées de plus en plus pour les grands projets de reconstruction. Les unités portatives plus petites, pouvant rouler sur route et sur rail, et capables d'accomplir une seule fonction, seront utilisées pour effectuer des travaux périodiques entre les grandes révisions. À mesure que les intervalles diminueront entre les trains, on cherchera davantage, pour la conception de l'équipement d'entretien, à accroître la vitesse de fonctionnement, la fiabilité, la simplicité et l'automatisation.

Les traverses de béton n'ont pas encore prouvé leur utilité. D'une durée de vie utile de 50 ans, elles coûtent deux fois plus que les traverses de bois, qui durent 30 ans. Elles sont également censées réduire les frais d'entretien de 30 % et accroître le rendement énergétique de la locomotive en assurant un meilleur alignement. Sur les voies ferrées canadiennes, on utilise maintenant de façon courante les traverses de béton pour remplacer celles en bois, là où les courbes sont prononcées et où la circulation est dense.

Le rail à base continue, qui utilise une infrastructure de béton pour supporter les rails, fait l'objet d'essais dans certains pays étrangers. En Amérique du Nord, il pourra peut-être permettre de réduire les coûts dans les sections où les courbes prononcées et les tunnels augmentent les frais d'entretien ou compliquent les travaux.

On utilise maintenant des géotextiles pour améliorer la stabilité des infrastructures dans les sections où la pénétration de l'eau constitue un problème. Les tapis font fonction de mèches qui attirent l'eau sur les côtés des infrastructures.

Chapitre 9

TENDANCES DE LA PRODUCTIVITÉ

9.1 Introduction

Les chapitres 2 à 8 ont porté sur les progrès techniques qui sont survenus depuis 1945. Le présent chapitre indique les changements qui se sont produits au niveau de la productivité durant la même période. La circulation s'est accrue dans une proportion de 2,5 alors que la longueur des voies et le nombre de locomotives et de wagons à marchandises sont demeurés à peu près les mêmes. Ces chiffres révèlent une utilisation insuffisante des lignes secondaires et des voies d'évitement peu fréquentées dans le passé ainsi que les progrès techniques et les changements institutionnels qui sont survenus pendant cette période. Les effets des principaux progrès techniques seront soulignés.

La courbe des tendances laisse généralement voir deux périodes distinctes. De 1945 à 1962, les chemins de fer sont passés de la vapeur au diesel. Entre 1963 et 1978, la conversion a été terminée et l'accroissement de la productivité a été limité par des modifications au niveau de la puissance des locomotives et de la taille des trains. Dans le présent chapitre, on utilise l'unité "tonne-mille" comme mesure approximative de la productivité physique. Les tendances de la productivité qui sont présentées concernent toutes des sociétés ferroviaires canadiennes.

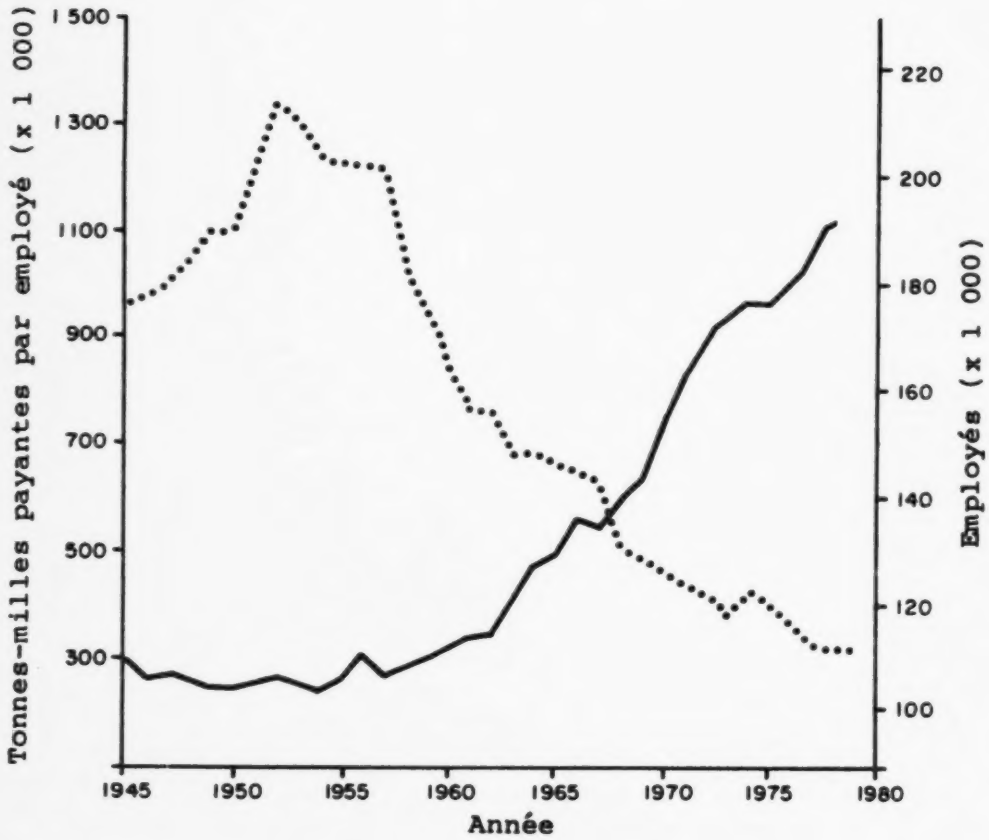
9.2 Étude des tendances

Un exemple de changement institutionnel qui a contribué à l'accroissement de la productivité de la main-d'oeuvre a commencé à se manifester en 1957 (voir la figure 9.1). Des employés qui avaient été engagés durant la période de pointe des activités ferroviaires avant la dépression ont commencé à prendre leur retraite à peu près vers cette date, après 30 ou 35 années de service. Bon nombre d'entre eux n'ont pas été remplacés.

La tendance à la hausse est également attribuable aux progrès techniques. Par suite du passage de la vapeur au diesel, un grand nombre d'employés qui assuraient le service de l'eau et du charbon et l'entretien des locomotives n'étaient plus requis. Leur nombre a été réduit par le processus d'attrition plutôt que par des congédiements.

Figure 9.1

TONNES-MILLES PAR EMPLOYÉ, 1945-1978



Sources: [3], [4]

Les progrès techniques et le coût croissant de la main-d'oeuvre ont depuis contribué à la diminution constante du nombre des employés. L'informatique a amélioré l'efficacité des systèmes de commande de la circulation et des gares de triage, qui ont connu une réduction de leur personnel. La mécanisation des systèmes de chargement et de déchargement a également contribué à faire diminuer le nombre des employés. Mesurée en tonnes-milles par employé, la productivité de la main-d'oeuvre s'est accrue dans une proportion de 4,0 depuis les années 1950.

Depuis 1945, presque toutes les améliorations du rendement énergétique ont été le résultat de progrès techniques. Ce n'est que récemment que les méthodes de fonctionnement des trains et les programmes de formation ont commencé à influer sur la consommation de carburant.

Dans la figure 9.2, nous remarquons une augmentation soudaine du nombre de tonnes-milles produites par B.T.U. de carburant consommé. Cette augmentation correspond à l'abandon de la vapeur, qui a cédé la place à des locomotives diesel ayant un rendement thermique six fois supérieur à celui des unités à la vapeur.

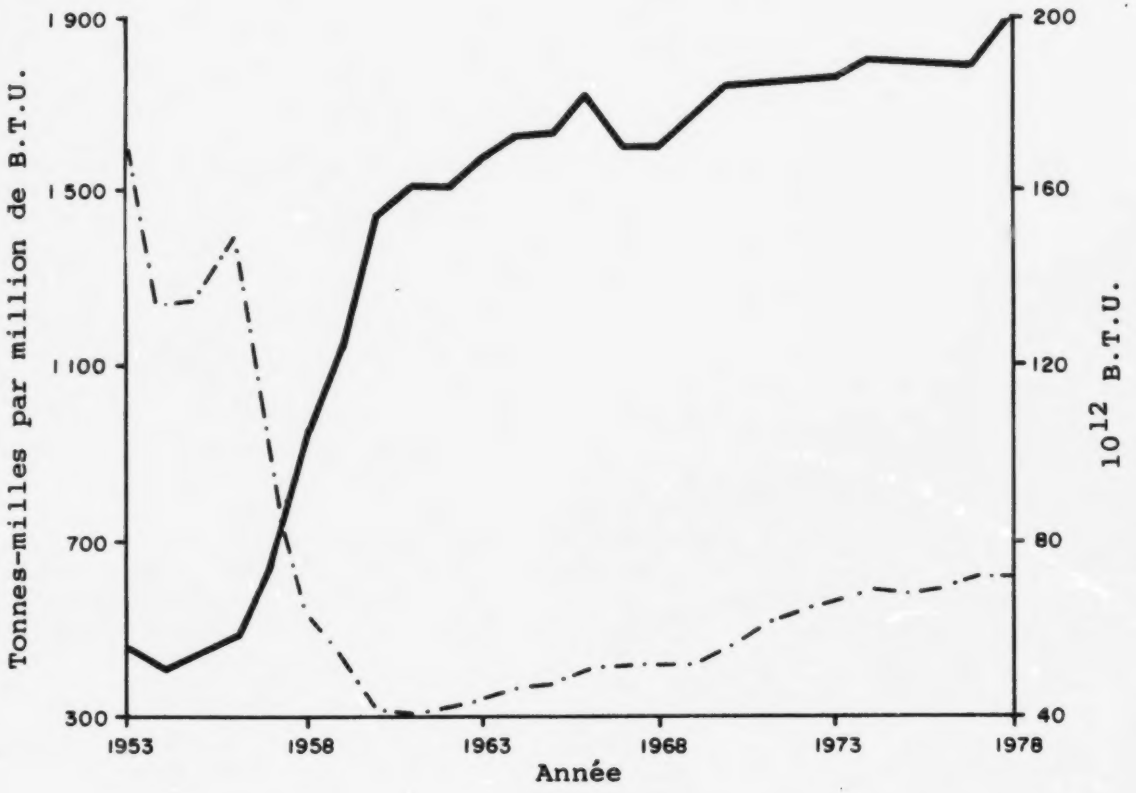
À mesure que les moteurs diesel s'amélioraient au fil des années, des augmentations plus modestes du rendement énergétique ont été réalisées. La turbocompression, bien qu'elle ait augmenté de façon considérable la puissance possible à partir d'une seule unité, n'a pas entraîné d'augmentation sensible de l'économie de carburant. Étant donné que les coûts croissants du carburant constituent une part de plus en plus importante des frais de fonctionnement, la demande en faveur de locomotives plus efficaces sur le plan énergétique commence de nouveau à faire hausser la courbe de la productivité énergétique.

La mise au point de wagons à marchandises d'une capacité plus grande contribue à la productivité de plusieurs facteurs. La figure 9.3 montre que si le nombre de milles par wagon chargé s'est accru de 23 % depuis 1945, le nombre de tonnes-milles par wagon, par contre, a augmenté de 94 %. L'accroissement de la productivité résulte d'une augmentation de la charge utile moyenne et d'une meilleure utilisation annuelle. Un nombre de plus en plus grand de wagons à marchandises sont conçus pour une charge maximale par essieu de 60 000 livres, tout en réduisant le poids à vide du wagon. Il en résulte une capacité moyenne supérieure.

En plus des capacités plus fortes, on dénote également une tendance en faveur d'un accroissement du rapport charge utile moyenne/capacité. Le nombre croissant de wagons utilisés pour transporter des ressources, qui sont chargés à leur pleine capacité ou presque, a pour effet de hausser le facteur de charge du wagon moyen. Les capacités supérieures ainsi que les facteurs de charge plus élevés expliquent l'augmentation de la charge moyenne par wagon, qui est illustrée à la figure 9.4.

Figure 9.2

TONNES-MILLES PAR MILLION DE B.T.U., 1953-1978



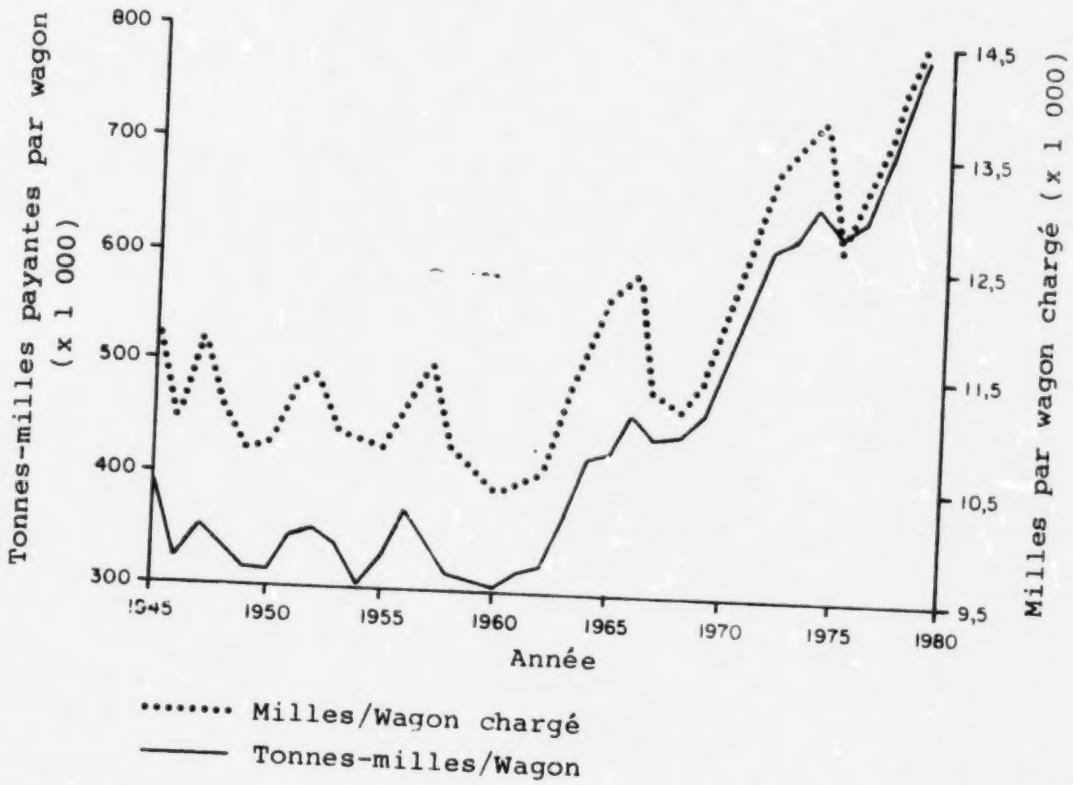
Diesel: 20 000 B.T.U./lb (99 000 B.T.U./gallon)

Charbon: 13 500 B.T.U./lb (27 x 10^6 B.T.U./tonne)

Sources: [3], [4], [51]

Figure 9.3

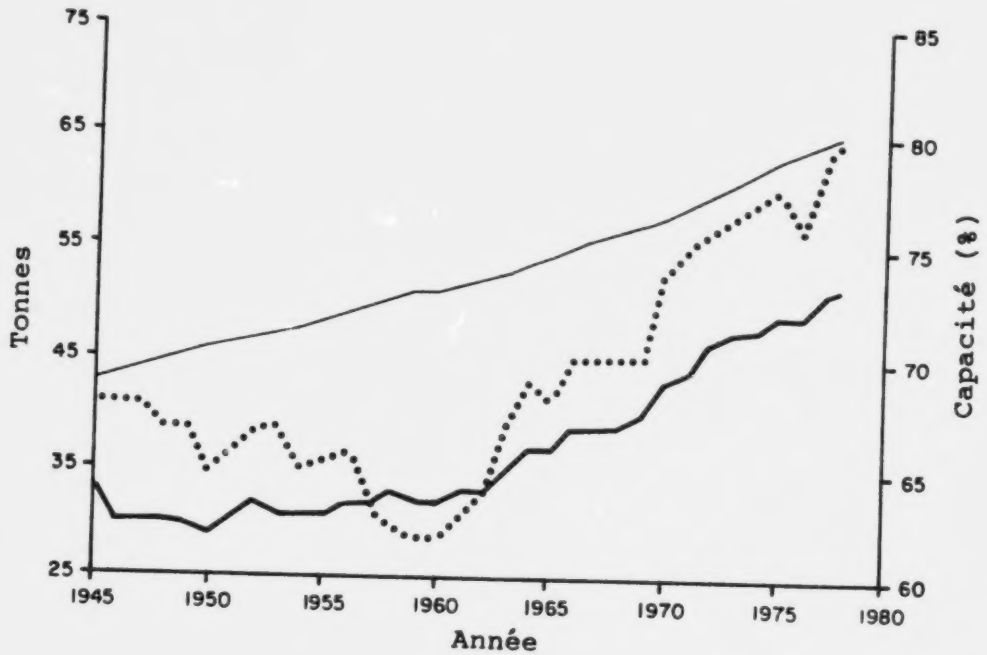
TONNES-MILLES PAR WAGON À MARCHANDISES, 1945-1978



Sources: [3], [4], [51]

Figure 9.4

CAPACITÉ ET CHARGE MOYENNES DES WAGONS
À MARCHANDISES, 1945-1978



Sources: [3], [4], [5], [51]

À mesure que diminue le nombre d'anciens wagons de capacité plus faible, les augmentations futures du nombre de tonnes-milles par wagon seront attribuables à une meilleure utilisation des wagons, et à une réduction du temps passé aux terminaux et des arrêts nécessités par l'entretien. L'augmentation des charges moyennes par wagon et une meilleure utilisation ont pour effet d'accroître la productivité de la main-d'oeuvre, des capitaux et des matériaux.

Ces tendances sont attribuables à deux facteurs. Premièrement, le coût élevé du capital pour l'achat de wagons à marchandises supplémentaires en vue d'obtenir une capacité donnée favorise le développement de wagons d'une plus forte capacité. Deuxièmement, les coûts croissants du carburant ont incité à sacrifier le poids à vide en faveur de la charge utile.

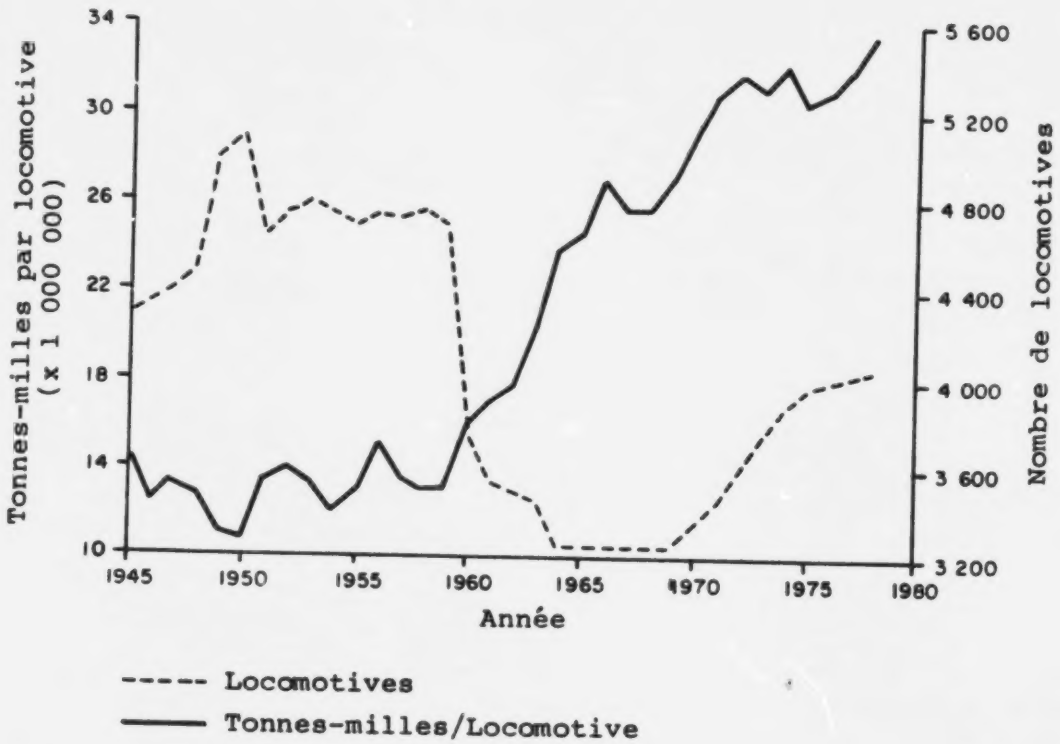
La hausse des charges moyennes atteindra éventuellement son sommet et il est possible que la tendance se renverse. La charge par essieu des wagons actuels est à son maximum et une réduction additionnelle du poids à vide ne permettra que des augmentations modestes de la charge utile. Les sociétés ferroviaires se tournent maintenant vers les marchandises de faible densité, qui sont devenues rentables grâce aux wagons couverts de fort volume et au service de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat. Ce phénomène aura tendance à réduire la charge utile moyenne. On peut prévoir que la capacité moyenne des wagons atteindra un plateau de 75 à 80 tonnes au cours des dix prochaines années, avec un parc de wagons pouvant transporter des marchandises de poids lourd ou de volume élevé.

Les coûts croissants du carburant et du capital ont eu pour effet d'accroître en particulier la productivité des locomotives. Les améliorations apportées à l'effort de traction ont tendance à réduire le nombre de locomotives requises pour monter une pente, alors que les améliorations de l'entretien augmentent la disponibilité des locomotives. Les innovations qui surviennent dans tous ces domaines visent à réduire le nombre de locomotives requises pour transporter un volume fixe. La figure 9.5 montre l'évolution du nombre moyen de tonnes-milles par locomotive au cours de cette période.

La première innovation technique importante a été le passage de la vapeur au diesel entre 1948 et 1962. À la suite de la diésélisation, l'avènement de la turbocompression a presque doublé la quantité de travail que pouvait exécuter une seule locomotive. À mesure que la puissance se stabilise, on accroît encore davantage la productivité par une meilleure disponibilité des locomotives et une amélioration des caractéristiques de la traction. Évidemment, les gains de productivité sont également attribuables à l'amélioration de la conception des wagons. L'accroissement de la capacité des wagons et la réduction de leur poids à vide ont pour effet d'augmenter le nombre de tonnes-milles payantes pour chaque tonne brute de marchandises.

Figure 9.5

TONNES-MILLES PAR LOCOMOTIVE, 1945-1978



Sources: [3],[4],[5]

Le nombre de tonnes-milles par mille de voies exploitées est une mesure du niveau d'utilisation du réseau actuel. Cette mesure apparaît à la figure 9.6.

En 1962, le nombre de tonnes-milles par mille de voies exploitées a commencé à augmenter de façon régulière, par suite d'un accroissement de la demande qui n'a pas été accompagnée d'une augmentation significative de la longueur du réseau. À partir de 1975, le nombre de milles de voies a commencé à baisser alors que la demande s'est accrue, et il en est résulté un accroissement rapide du nombre de tonnes-milles par mille de voies. Cette situation reflète un regroupement du trafic sur les lignes principales, où les systèmes de commande centralisée de la circulation peuvent accroître la capacité des lignes principales sans recourir à une double voie.

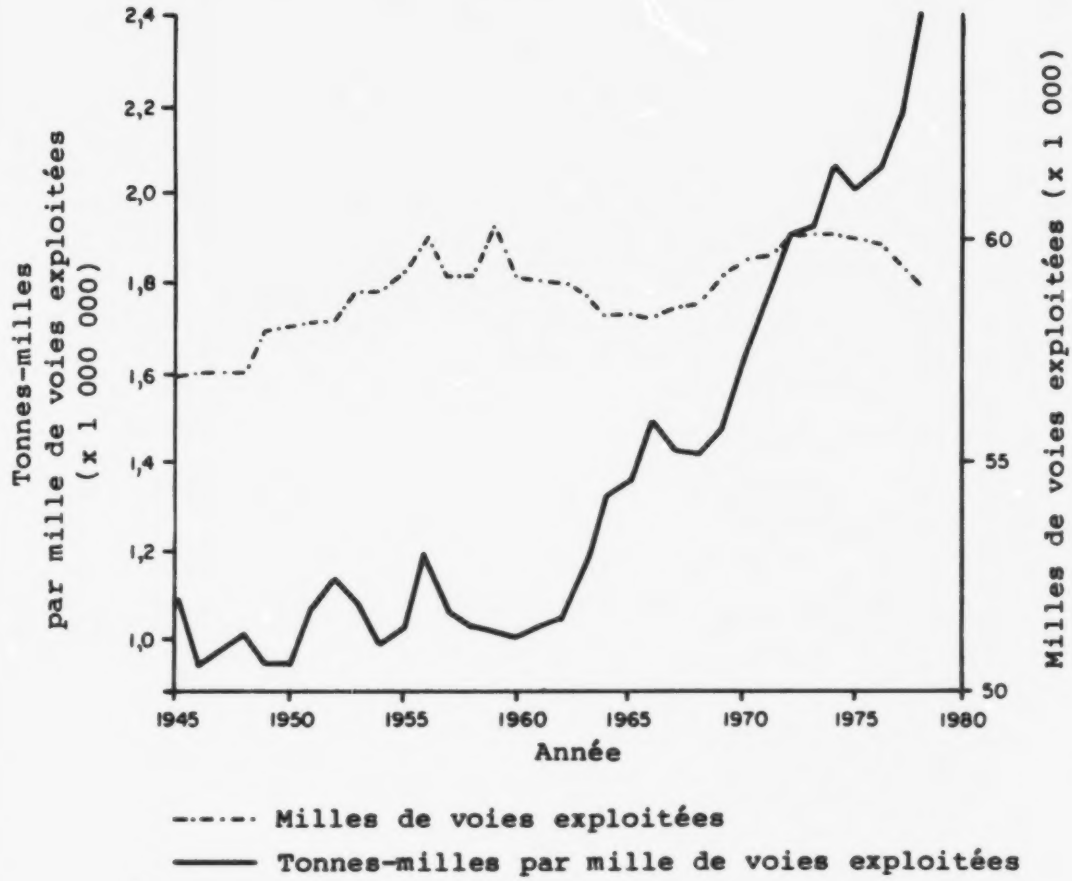
9.3 Résumé

Les tendances de la productivité montrent les effets de la technologie et de l'organisation comme le rapport entre le nombre de tonnes-milles et diverses contributions en main-d'oeuvre, en capital et en matériaux. Depuis 1945, la productivité de la main-d'oeuvre est passée de 300 à plus de 1 100 tonnes-milles par employé, par suite de la diésélisation et de la mise à la retraite d'employés qui avaient été engagés pendant la période de pointe des activités ferroviaires avant la dépression. La productivité énergétique est passée de 376 tonnes-milles par million de B.T.U. en 1953 à 1 900 tonnes-milles par million de B.T.U. en 1978. Le passage de la vapeur au diesel a été le principal facteur qui a contribué à cette amélioration. Les unités diesel ont un rendement six fois supérieur à celui des locomotives à vapeur. La productivité énergétique se met de nouveau à croître à mesure que les progrès techniques mettent l'accent sur le rendement énergétique. L'accroissement de la capacité des wagons, l'augmentation des facteurs de charge et l'amélioration de l'utilisation annuelle ont eu pour effet de faire passer le nombre de tonnes-milles par wagon de moins de 400 000 en 1945 à environ 750 000 en 1978. Cette capacité accrue reflète la conception des wagons modernes, qui offre une efficacité structurale élevée, un poids à vide plus faible et une charge maximale par essieu. Le poids brut des wagons ne devrait pas dépasser 265 000 livres, à moins qu'on abandonne les wagons à quatre essieux pour les wagons à six essieux. L'utilisation améliorée des wagons, qui contribue également à la productivité, est le résultat d'une réduction des temps d'arrêt pour l'entretien, d'une accélération des méthodes de chargement et de déchargement, et d'une diminution du temps passé dans les gares de triage automatisées (voir la figure 9.6).

Depuis 1945, la productivité des locomotives est passée de 14 000 000 à 34 000 000 de tonnes-milles par locomotive-année. Les progrès techniques qui expliquent cette augmentation

Figure 9.6

TONNES-MILLES PAR MILLE DE VOIES EXPLOITÉES,
1945-1978



Sources: [3], [4], [5], [51]

sont la diésélisation, qui a grandement accru la disponibilité des locomotives, ainsi que la turbocompression, qui a augmenté la puissance des locomotives. Plus récemment, la productivité des locomotives s'est encore accrue, par suite d'augmentations modestes de la puissance, des perfectionnements apportés à l'effort de traction, d'une meilleure disponibilité et d'une amélioration du rapport charge utile/poids brut des wagons modernes.

Le nombre de tonnes-milles par mille de voies a monté de façon régulière depuis 1962, passant de 1 000 000 à près de 3 000 000 par année en 1978. Le regroupement du trafic sur des lignes principales qui font l'objet d'une régulation centralisée et l'abandon des lignes secondaires peu fréquentées ont également contribué à cette tendance.

Chapitre 10

LE MILIEU DE DEMAIN ET SES EFFETS SUR LA TECHNOLOGIE

10.1 Scénarios de l'évolution du chemin de fer

Les progrès techniques à long terme sont déterminés par les influences externes du milieu dans lequel le chemin de fer doit fonctionner. Comme il est impossible de prédire avec certitude la suite des événements qui créeront ce milieu futur, on doit établir le scénario le plus probable. L'orientation que prendra la technologie d'ici l'an 2000 et au-delà en vertu de ce scénario fait l'objet de conjectures.

Comme pour toute prévision, la seule certitude est qu'elle ne se réalisera pas dans tous ses aspects. Les raisons en sont nombreuses. Qu'il suffise de dire que si les forces économiques, financières, techniques et politiques qui sont actuellement à l'oeuvre au Canada et dans le monde évoluent de la façon dont les choses se passent actuellement, alors la période allant jusqu'à l'an 2000 ressemblera passablement à celle qui est décrite dans le présent chapitre.

Ce regard vers l'avenir doit être nécessairement subjectif et général. Un examen sérieux et en profondeur des vingt prochaines années dépasse le champ du présent rapport.

La partie qui suit précise les facteurs externes qui influeront sur l'orientation des progrès techniques des chemins de fer.

10.2 Facteurs influant sur le milieu futur du chemin de fer

La mise en oeuvre et l'optimalisation des techniques font suite à la fois à des besoins internes des chemins de fer et à des facteurs externes sur lesquels ils n'ont aucun contrôle. Les facteurs externes déterminent le milieu dans lequel les sociétés ferroviaires doivent fonctionner. Les principaux facteurs qui composent ce milieu sont les suivants:

a) énergie,

b) capital,

c) main-d'oeuvre,

d) demande,

e) politiques du gouvernement, et

f) réglementation.

Il existe bon nombre d'autres facteurs qui pourraient être considérés. Cependant, ceux-ci sont présentés comme des indicateurs des tendances pour chacun des principaux groupes de facteurs qui influent sur l'évolution.

La compréhension des rapports futurs entre ces facteurs et les activités ferroviaires permettra d'identifier l'orientation des progrès techniques futurs dans les réseaux de chemins de fer.

La façon dont chacun de ces six facteurs environnementaux influent sur l'orientation des progrès techniques est décrite ci-après. Une partie subséquente présente le milieu le plus probable ainsi que certaines hypothèses concernant ses effets possibles sur la technologie.

Énergie

Parmi tous les facteurs externes qui influeront sur les progrès techniques, le prix et la disponibilité des différentes sources d'énergie exerceront les effets les plus sensibles. À court terme, les modifications des prix et des types d'énergie disponibles ont donné bon nombre de techniques efficaces sur le plan technique, qui peuvent être mises en oeuvre immédiatement. À plus long terme, l'incertitude des approvisionnements de carburant diesel a stimulé les recherches actuelles pour trouver d'autres carburants et des systèmes de propulsion perfectionnés pour l'avenir.

En restant dans la gamme des techniques disponibles, les sociétés ferroviaires chercheront à optimaliser leurs opérations en vue de réduire la consommation de carburant. À l'extérieur du secteur ferroviaire, la question de l'énergie pourrait modifier complètement la demande de services de transport.

Capital

La disponibilité des capitaux constitue le facteur le plus important pour la mise en oeuvre opportune des nouvelles techniques. Il existe actuellement bon nombre de nouvelles techniques et les sociétés ferroviaires sont de plus en plus disposées à les adopter. Cependant, dans une industrie de capital comme le chemin de fer, les ressources qui peuvent servir à leur mise en oeuvre sont limitées.

De plus, les activités de recherche et de développement dépendent étroitement de la disponibilité des

capitaux. La recherche est souvent le premier domaine à être sacrifié lorsqu'on répartit les maigres capitaux entre les différentes opérations.

Main-d'oeuvre

Le coût croissant de la main-d'oeuvre incite les sociétés ferroviaires à automatiser les activités de main-d'oeuvre et à améliorer la productivité de la main-d'oeuvre grâce à des innovations techniques.

Demande

Le niveau et la nature de la demande influent sur l'évolution et le type des techniques requises pour fournir une capacité donnée.

Politiques du gouvernement

Les décisions qui sont prises en matière de politiques dans de nombreux secteurs ont une influence sur la demande et les progrès techniques. La politique intérieure concernant le développement et la consommation des ressources influent sur le mouvement des ressources à l'intérieur du pays. Les décisions politiques ont un effet sur certaines questions comme l'électrification et la double voie. Sans ces facteurs externes, les décisions concernant ces questions s'appuieraient sur les critères économiques perçus par les sociétés ferroviaires.

La politique canadienne actuelle consiste à diminuer la demande de pétrole et à accroître celle de gaz, d'électricité, d'énergie renouvelable et de charbon [92]. Cette politique et certaines pressions d'ordre économique ont stimulé les recherches sur les nouveaux carburants.

Les politiques du gouvernement en matière de commerce extérieur détermineront le niveau et la nature des importations et des exportations vers les ports de la côte est et de la côte ouest. Les politiques énergétiques influeront sur les choix qui seront faits en matière d'énergie et, par conséquent, sur les techniques qui seront adoptées à l'avenir. Par contre, l'absence de politique retardera également le développement de certaines sources et techniques énergétiques.

Réglementation

Les coûts engagés pour satisfaire aux règlements sur la sécurité, l'environnement et les opérations détourneront une partie des ressources disponibles pour les progrès techniques.

Dans d'autres cas, les règlements accordant des subventions à l'expéditeur qui utilise le transport ferroviaire stimuleront la croissance du trafic et par conséquent les progrès techniques.

10.3 Scénario le plus probable

10.3.1 Description

a) Selon le scénario le plus probable, le prix du pétrole continuera d'augmenter pour atteindre le prix mondial en 1990. À mesure que le prix augmentera, d'autres sources de pétrole deviendront disponibles, ce qui prolongera la durée des approvisionnements. À long terme, le pétrole demeurera le carburant préféré jusqu'à ce que son prix atteigne celui des autres carburants. Le charbon est un exemple de carburant dont le prix s'élève à 50 % de celui du pétrole; cependant, lorsqu'on ajoute ses autres coûts à son prix, il est plus dispendieux que le pétrole. L'hydrogène est un exemple de carburant dispendieux qui pourrait éventuellement remplacer le pétrole.

b) Les capitaux continueront probablement d'être limités.

c) Le chemin de fer conservera ou accroîtra sa part de trafic de marchandises de valeur, à mesure que le transport mondial de marchandises conteneurisées prendra de l'ampleur et que les coûts du transport routier de longue distance augmenteront. On estime que 25 % des besoins du Canada central en charbon seront assurés par l'Ouest canadien. Le transport des ressources aux fins de l'exportation s'accroîtra de 60 % d'ici l'an 2000. Les taux de croissance actuels de 15 % par année pour le transport intermodal et de 5 % par année pour le transport par wagon se maintiendront.

d) Une décision en vue d'électrifier les lignes principales sera prise d'ici l'an 2000.

e) L'installation d'une double voie constituera une décision économique qui devra être prise par les sociétés ferroviaires.

f) Le commerce extérieur s'accroîtra mais sa croissance sera limitée par la concurrence sur d'autres marchés, par exemple le transport du charbon de l'Australie au Japon.

10.3.2 Changements technologiques

En raison de l'augmentation du prix du pétrole, les sociétés ferroviaires recourront de plus en plus aux carburants hybrides hors spécifications et diesel qui peuvent être utilisés moyennant un minimum de modifications aux moteurs existants. Face à des pressions économiques et politiques de plus en plus fortes pour réduire encore davantage la consommation de carburant diesel dans les années 1990, les sociétés ferroviaires auront le choix entre l'achat de nouveaux moteurs complètement différents utilisant des carburants de remplacement, ou l'électrification; ils opteront probablement pour la deuxième solution. La technologie de l'électrification pour les lignes à circulation dense a déjà connu des progrès importants et donné de bons résultats dans d'autres parties du monde. Des projets pilotes seront probablement suivis d'un programme de mise en oeuvre complète pour les lignes principales à compter de 1995.

Les systèmes de propulsion utilisant d'autres carburants et à double mode pourront être utilisés sur les lignes peu fréquentées qui ne sont pas électrifiées. On cherchera cependant à réduire le nombre des lignes à faible circulation en vue de conserver l'énergie et pour des raisons financières. Ces parcours seront plutôt desservis par le transport routier.

À court terme, des économies de carburant de 25 % (exprimées en tonnes-milles/gal.) pour les locomotives devraient être possibles d'ici 1990. Pour ce faire, il faudra modifier graduellement les conceptions actuelles, mieux contrôler la performance et le fonctionnement des trains, accroître la charge utile, améliorer l'entretien et l'équipement moteur et mieux former le personnel des chemins de fer grâce à l'utilisation de certains appareils comme le stimulateur de locomotive.

Les capitaux demeurant limités, les progrès techniques se traduiront par une amélioration des conceptions actuelles. Les conceptions radicalement différentes passeront par une longue période d'élaboration afin d'assurer la réussite de leur commercialisation. Dans les années 1990, des capitaux seront probablement affectés à l'électrification de certaines sections des lignes principales.

Même lorsqu'il aura été démontré que les nouvelles techniques sont réalisables, leur mise en oeuvre sera lente en raison du manque de capitaux. Les sociétés ferroviaires concentreront leurs efforts dans les domaines qui produisent les taux de rendement internes les plus élevés dans le moins de temps possible.

Suivant le scénario le plus probable, une diminution des demandes salariales et un élargissement des programmes de formation du personnel auraient pour effet de réduire la dépendance à l'égard de la technologie pour améliorer la

productivité de la main-d'oeuvre. Des dépenses d'immobilisations considérables, comme celles qui seraient requises pour accroître la longueur des trains, ne seraient pas justifiées sur le plan financier. La performance optimale des trains serait contrôlée par des mécaniciens formés à l'aide de simulateurs qui reproduisent les conditions existantes sur une route donnée sans nécessiter de systèmes compliqués pour le contrôle automatique des trains.

En vertu de ce même scénario, la main-d'oeuvre recevrait une meilleure formation grâce à certaines techniques comme le simulateur de train. Grâce aux progrès techniques, les travailleurs les plus expérimentés amélioreraient la productivité de la main-d'oeuvre. Le niveau des demandes salariales déterminera la vitesse à laquelle les techniques permettant d'économiser la main-d'oeuvre pourront être instaurées. Même si ces demandes étaient modérées, les sociétés ferroviaires ne renonceraient pas à mettre en oeuvre la plupart de ces techniques.

Les sociétés ferroviaires mettront davantage l'accent sur le niveau du service en vue d'accroître le volume de leur service de transport de conteneurs/remorques sur wagon plat. Il en résultera une réduction du temps passé dans les terminaux et une amélioration de la performance. L'automatisation des gares de triage et la spécialisation de l'équipement de manutention des conteneurs apporteront une contribution dans ce sens.

Afin de pouvoir répondre à la demande croissante de services de transport des ressources, il faudra des trains ayant des unités plus nombreuses et peut-être plus grosses. Ces trains lourdement chargés exigeront à leur tour une amélioration de la structure des voies et une augmentation des services d'entretien. Les longs rails soudés et les traverses de béton qui sont actuellement placés dans les régions montagneuses pourraient être installés sur tout le réseau de lignes principales, là où la circulation est dense.

RÉFÉRENCES

[1] F. COTTRELL, Technological Change and Labour in the Railroad Industry, Lexington (Mass.), Heath Lexington Books, D.C. Heath and Company, 1970.

[2] STATISTIQUE CANADA, "Statistique du matériel, des voies et du carburant", dans Transport ferroviaire: Partie III, publication n° 52-209, Ottawa, diverses années.

[3] STATISTIQUE CANADA, Les Chemins de fer Nationaux du Canada et Canadien Pacifique Limitée, publication n° 52-213, Ottawa, diverses années.

[4] STATISTIQUE CANADA, Canadien Pacifique Limitée, 1923-1971, publication n° 52-202, Ottawa, 1973.

[5] STATISTIQUE CANADA, Les Chemins de fer Nationaux du Canada, 1923-1971, publication n° 52-201, Ottawa, 1973.

[6] H.L. SMITH, "Diesel Development, Rail-Truck Motive Power", dans Traffic World, 21 juin 1976.

[7] Publicité de la Union Pacific Railroads, dans Railway Age, 25 février 1980.

[8] Publicité de la Sante Fe Railroads, dans Railway Age, 11 février 1980.

[9] H.G. McCLEAN, "Long Term Trends in North American Diesel Power", dans Railway Gazette International, mars 1973.

[10] "CP Rail to Rebuild 400 Locomotives", dans Railway Age, 11 août 1980.

[11] J.H. ARMSTRONG, "Goal for the '80's: Fuel Efficiency", dans Railway Age, 14 avril 1980.

[12] BOMBARDIER INC., Specifications, HR-618, 3600-hp Diesel Electric Road Locomotive, Montréal, Bombardier Inc., janvier 1981.

[13] V.L. SMITH, "The Diesel From D to L-1," dans Trains, mai 1979.

[14] BOMBARDIER INC., Introducing the HRC Line, brochure de promotion, Montréal, Bombardier Inc., Division des produits ferroviaires et diesel, 1981.

[15] F. MALONE, "Diesel Fuel: The Squeeze Is On", dans Railway Age, 13 août 1979.

[16] M. EPHRAIM, "A Personal Philosophy in Diesel Engine Design", dans Railway Gazette International, février 1979.

[17] R. KELLER, Gas Turbine Drive for New High Speed Trains, American Society of Mechanical Engineers, publication n° 75-GT-88, 1975.

[18] L.J. LAWSON et L.M. COOK, Wayside Energy Storage Study, "Volume 1 - Summary", FRA/ORD 78/78 I; "Volume II - Detailed Description of Analysis", FRA/ORD 78/78 II; "Volume III - Engineering Economic Analysis: Data and Results", FRA/ORD 78/78 III; "Volume IV - Dual-Mode Locomotive Preliminary Design Study", FRA/ORD 78/78 IV, février 1971.

[19] GARRETT MANUFACTURING LTD., "Application of Wayside Energy Storage System Concepts to Canadian Railways", Garrett Manufacturing Ltd., publication TP 2463 de Transports Canada, février 1980.

[20] J. KOPER et D. SPANTON, "Recent Advances and Future Opportunities in Energy Conservation", Communication technique présentée à la quinzième Railroad Engineering Conference, "Railroad R & D Challenges of the 80's: Opportunities and Obstacles", ministère des Transports des États-Unis, Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, juin 1980.

[21] L.M. COOK et al., "Flywheel Energy Storage Switcher", "Volume I - Study Summary and Detailed Description of Analysis", FRA/ORD I, "Volume II - Field Data", FRA/ORD 79/20 II, avril 1979.

[22] J.H. ARMSTRONG, "Solid Fuel Railroading in the 80's", dans Railway Age, 13 octobre 1980.

[23] J.J. DWYER, "What's Your Problem", dans Railway Locomotives and Cars, octobre 1973.

[24] D.M. CONSIDINE, "Energy Technology Handbook", McGraw-Hill, 1976.

[25] "GP50 Puts 3,500-hp on Four Axles", dans Railway Gazette International, juin 1980.

[26] M.E. JACOBS, "Fuel Efficiency Improvement in Rail Freight Transportation: Multiple Unit Throttle Control to Conserve Fuel", Washington (D.C.), Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, février 1978.

[27] C.W. ENGLISH, "Canadian Railway Energy Conservation and Alternate Fuels", Université Queen's, Kingston, Institut canadien des transports terrestres guidés, août 1978.

[28] F.F. NOUVION, "Electric and Diesel Locomotives in Operation - A Railway Man's Experience", communication technique de l'IEEE présentée à la conférence ASME/IEEE/AAAR sur les chemins de fer, Colorado Springs, 12-14 avril 1979.

[29] E.F. LINDSLEY, "Bottoming-Cycle Engines Use Waste Heat to Save Gas", dans Popular Science, janvier 1976.

[30] V.L. SMITH, "The Diesel from D to L-1", dans Trains, juillet 1979.

[31] "CP Refitting Diesels to Modernize Fleet", dans The Citizen, Ottawa, 14 octobre 1980, p. 49.

[32] J.J. KOTLIN et al., "Higher Fuel Efficiency for EMD Diesel Locomotives", publication 78-RT-4 de l'ASME, conférence IEEE/ASME sur les chemins de fer, St. Paul (Minn.), 11-13 avril 1978.

[33] CHEMINS DE FER NATIONAUX DU CANADA, "Positive Traction Control", Montréal, Les Chemins de fer nationaux du Canada, Centre de recherche, Recherche et développement, mars 1974.

[34] J. KORBER et W. TEICH, "Three-Phase Propulsion in Diesel and Electric Locomotives for Heavy Freight and Fast Passenger Service", communication technique de l'IEEE présentée à la conférence ASME/IEEE/AAR sur les chemins de fer, Washington (D.C.), 30 mars-1er avril 1977.

[35] "TDC Project Directory 1980 Edition", Montréal, Centre de développement des transports, publication TP 1936 de Transports Canada, 1980.

[36] R. STOKES, "Three Phase Traction Problems and Prospects", dans Railway Gazette International, novembre 1976.

[37] C.W. PARKER, The Operation of Long Trains for Ore and Coal Using Radio-Controlled Mid-train Locomotives, Montréal, Société d'études et de consultation du Canadien Pacifique Limitée, juin 1976.

[38] F. MALONE, "In-Cab Computer is on the Way", dans Railway Age, 9 avril 1979.

[39] V.L. SMITH, "The Diesel from D to L-1", dans Trains, juin 1979.

[40] G. WELTY, "The Search for Alternative Diesel Fuel", dans Railway Age, 8 septembre 1980.

[41] R.W. FOSTER et W.J.D. ESCHER, "Hydrogen-Fueled Railroad Motive Power Systems, A Feasibility Study", Escher Technology Associates, rapport PR-70, septembre 1976.

[43] P. VALETTE et al., "Analysis of a Delphi Study on Hydrogen", première conférence mondiale sur l'énergie à hydrogène, 1er-3 mars 1976, Actes, volume III.

[44] HYCARB ENGINEERING LTD., "Fuel Supply for Diesel Locomotives", Montréal, Hycarb Engineering Ltd., publication TP 2709 de Transports Canada, septembre 1980.

[45] "Electrification: The Work Has Already Started", dans Railway Gazette International, janvier 1980.

[46] "Electrification Talk is Getting More Serious", dans Railway Age, 24 novembre 1980.

[47] R.W. LAKE et al., "Canadian Railway Electrification Study: Phase I", Université Queen's, Kingston, Institut canadien des transports terrestres guidés, 1976.

[48] P.D. LYALL, "Energy Requirements from Initial Production to Final Consumption for Diesel-Electric and Full Electric Traction", document inédit, R.S. Wallace & Associates Ltd., avril 1978.

[49] G. COCKEL et al., "Car & Locomotive Cyclopedia", New York, Simmons-Boardman Publishing Corporation, 1974.

[50] Plans de wagons préparés par le Railroad Educational Bureau, Omaha (Nebraska), 1970.

[51] STATISTIQUE CANADA, "Transport ferroviaire: Partie III, Statistiques du matériel, des voies et du carburant", publication n° 52-209, Ottawa, diverses années.

[52] STATISTIQUE CANADA, "Transport ferroviaire: Partie IV, Satistiques de l'exploitation et du trafic", publication n° 52-210, Ottawa, diverses années.

[53] "Forest to Market: A Variety of Products Requires a Variety of Cars", dans Railway Age, 29 septembre 1980.

[54] "The Car is Sturdy and the Price is Right", dans Railway Age, 25 août 1980.

[55] Publicité de la division ACF/Amcar, dans Railway Age, 11 août 1980.

[56] "What Carbuilders are Producing to Carry all that Coal", dans Railway Age, 25 février 1980.

[57] "Jane's All the World's Railways", New York, Franklin Watts Inc., 1978.

[58] G. WELTY, "General American's Tank Train", dans Railway Age, 26 mai 1980.

[59] "Wagons Designed to Win Back Merchandise Traffic", dans Railway Gazette International, février 1980.

[60] G. WELTY, "TOFC/COFC In 77: A Time for Testing And a Time for Growing", dans Railway Age, mai 1977.

[61] G. WELTY, "Intermodal: Evolution and Revolution", dans Railway Age, 28 juillet 1980.

[62] "Rail Dynamics Lab: Movers and Shakers", dans Railway Age, 8 septembre 1980.

[63] "Budd's Entry In the Piggyback Sweepstakes", dans Railway Age, 8 décembre 1980.

[64] "Initial Roadrailer Commercial Test Results Labelled Satisfactory", dans Container News, février 1981.

[65] "Roadrailer: An Idea Whose Time Has Come?", dans Railway Age, 11 juillet 1977.

[66] William J. CAVENAGH, "Roadrailer: The Crucial Test", dans Railway Age, 30 juillet 1979.

[67] "Bi-Modal Orders Roadrailer from Budd", dans Railway Age, 25 février 1980.

[68] BOOZ, ALLEN & HAMILTON INC., "Piggyback: The Efficient Alternative for the '80's", New York, Booz, Allen & Hamilton Inc. pour Transamerica Interway Inc., 1980.

[69] P. MARCOTTE et W.N. CALDWELL, "Articulated Truck Development", Montréal, Centre de recherche CN Rail, 3 juin 1977.

[70] "Centre de recherche CN Rail", brochure d'information distribuée par le Centre de recherche CN Rail, Montréal, 1980.

[71] G. WELTY, "The Search For Durability", dans Railway Age, 26 mai 1980.

[72] Correspondance particulière avec R.P. Rennie, chef de la Recherche, CN Rail, Montréal, 11 février 1981.

[73] Joseph B. MEANS, "Computer Controlled Dispatching Systems", communication technique de l'IEEE présentée lors de la conférence ASME/IEEE/ARR sur les chemins de fer, St. Paul (Minn.), 11-13 avril 1978.

[74] John H. ARMSTRONG, "Dispatching By Computer: Why? How Much? How Soon?", dans Railway Age, 12 février 1979.

[75] G. WELTY, "The Computer Approach to Handling More Trains", dans Railway Age, 11 février 1980.

[76] Glen E. STINSON, "Supply Industry's Perspective", document technique présenté à la 13e Railroad Engineering Conference, Cambridge (Mass.), 21-23 octobre 1979.

[77] Paul B. ANUTA, "Rail Car Identification Using Pattern Recognition Techniques", communication technique de l'IEEE présentée à la conférence ASME/IEEE/AAR sur les chemins de fer, St. Paul (Minn.), 11-13 avril 1978.

[78] O.S. NOCK, Encyclopedia of Railroads, Galahad Books, 93, avenue Madison, New York, 1977.

[79] G. WELTY, "Computerized Car Scheduling: In Busy Times, A Service Tool; in Bad Times, a Cost Cutter", dans Railway Age, 11 août 1980.

[80] "Queensgate Quickens the Pace In Cincinnati", dans Railway Age, 13 octobre 1980.

[81] William F. CRACKER et Paul E. SPEH, "Electromagnetic Interference Impact On Railroad Classification Yards", communication technique de l'IEEE présentée à la conférence ASME/IEEE/AAR sur les chemins de fer, St. Paul (Minn.), 11-13 avril 1978.

[82] Publicité, "You Can Classify Wagons Automatically with the Distributed Computer System by GRS International", dans Railway Gazette International, mai 1976.

[83] BOOWELL, LEICH AND SYMEONIDES, "Automation of Flat Classification Yards", rapport 78-12, Université Queen's, Kingston, Institut canadien des transports terrestres guidés, juillet 1978.

[84] Frank MALONE, "The Target: Greater Sophistication, Reliability and Ease of Operation", dans Railway Age, 12 mai 1980.

[85] Charles GORDON, "Ballast Clearing Made Simple By Mechanical Monster", dans CP Rail News, volume 7, n° 12, 21 septembre 1977.

[86] John H. ARMSTRONG, "Southern Lays A Firm Foundation For Reliable Service", dans Railway Age, 8 octobre 1977.

[87] "Are Concrete Ties Ready?", dans Progressive Railroading, juin 1977.

[88] Frank MALONE, "How CN Stretches Its M/W Dollar", dans Railway Age, 8 septembre 1980.

[89] Francis E. DEAN et Robert H. PRAUSE, Concrete and Wood Tie Track Performance Through 150 Million Gross Tons, Ohio, Battelle Columbus Labs, mars 1980.

[90] A. NARIYUKI, Y. FUHUI et T. NISHIOKA, "Fundamental Study of Continuously Supported Track", Permanent Way, N82, septembre 1979.

[91] Mervin H. DICK, "Geotextile: A Magic Carpet For Wet Roadbeds", dans Railway Age, 8 septembre 1980.

[92] Le programme énergétique national 1980, Ottawa, Énergie, Mines et Ressources Canada, 1980.

[93] J.H. ARMSTRONG, "SCL's Goal: Two Locomotives for the Price of One", dans Railway Age, 11 février 1980.

[94] G. WELTY, "Outlook: Fewer Yards, Faster Output", dans Railway Age, 13 octobre 1980.

[95] "Latest EMD Engines Aim At Cutting Fuel Consumption", dans Railway Gazette International, janvier 1980.

[96] J.H. ARMSTRONG., "The Tools are Getting Sharper", dans Railway Age, 11 août 1980.

APPENDICES

Appendice A

GLOSSAIRE

Adhérence - Force de frottemment entre des surfaces en contact, par exemple entre la roue d'une locomotive et le rail.

Articulation - Partage d'un même bogie par les extrémités adjacentes de deux véhicules.

Bogie - Plate-forme indépendante de 4 ou 6 roues, capable de pivoter autour du centre où elle est rattachée aux châssis de longs véhicules.

Commande centralisée de la circulation (CCC) - Terme englobant divers systèmes conçus pour aider le conducteur et éviter les mauvaises manoeuvres ou une interprétation erronée des signaux. Ces systèmes vont d'un simple système d'alerte dans la cabine à une commande entièrement automatique.

Commutateur - Dispositif électrique utilisé pour régler la direction du courant électrique.

Cycle de Stirling - Machine à vapeur de volume constant, actionnée par le chauffage et l'expansion rapides des gaz à l'intérieur d'un cylindre de travail. Elle utilise habituellement la combustion interne.

Diesel à aspiration naturelle - Moteur diesel qui n'est pas à turbocompression mais qui reçoit son alimentation en air à la pression atmosphérique ambiante.

Effort de traction - Force pouvant être utilisée pour tirer. L'effort de traction maximum qu'une locomotive peut fournir est le produit du poids de la locomotive par le coefficient d'adhérence entre la roue et le rail.

Hydrures d'hydrogène - Les composés ferreux du métal peuvent lier l'hydrogène à ses molécules, ce qui permet de stocker l'hydrogène en toute sûreté, sous des pressions modérées. En chauffant l'hydrure, on libère l'hydrogène gazeux qu'on peut utiliser comme carburant.

Moteur à cycle de Rankine - Machine thermique, comme une turbine ou une machine à vapeur à mouvement alternatif, actionnée par des gaz chauds, habituellement ceux qui sont chauffés par une source de combustion interne.

Transpondeur - Dispositif électronique (le long de la voie ou à bord de la locomotive) qui transmet des informations en réponse à un signal d'excitation.

Turbocompresseur - Ventilateur mécanique, actionné par l'impulsion des gaz d'échappement, qui force l'air dans le moteur.

Appendice B

TABLEAUX DES TENDANCES DE LA PRODUCTIVITÉ

Année	Tonnes-milles/employé (en milliers)	Employé (en milliers)	Tonnes-milles/ million de B.T.U.
1945			
1946	350		
1947	310	177	
1948	330	176	
1949	310	180	
	290	186	
1950		189	
1951	290		
1952	310	188	
1953	320	201	
1954	310	212	
1955	290	209	
1956	320	194	376
1957	360	192	416
1958	320	202	442
1959	340	199	480
	350	181	640
1960		176	984
1961	370		1 148
1962	390	164	
1963	400	156	1 463
1964	470	154	1 525
1965	520	148	1 512
1966	540	149	1 568
1967	610	147	1 660
1968	590	145	1 667
1969	650	143	1 725
	680	130	1 631
1970		129	1 631
1971	780		1 692
1972	860	126	
1973	940	124	1 750
1974	990	122	1 754
1975	1 020	118	1 769
1976	1 020	122	1 773
1977	1 090	119	1 812
1978	1 150	114	1 806
	1 220	112	1 797
		112	1 792
			1 903
Figure dans le texte	9.1	9.1	9.2

Année	B.T.U. (10^{12})	Tonnes-milles de marchandises payantes/wagon (en milliers)	Milles/wagon chargé (en milliers)	Capacité moyenne des wagons (tonnes)
1945		388	11,8	
1946		329	11,0	
1947		355	11,7	
1948		337	11,1	45,0
1949		318	10,7	
1950		314	10,8	
1951		350	11,3	
1952		362	11,4	
1953	170,0	342	10,9	47,0
1954	137,0	302	9,8	
1955	138,0	330	10,8	
1956	150,0	375	13,0	
1957	100,0		11,5	
1958	63,0	315	10,8	50,9
1959	54,0	312	10,6	51,0
1960	41,0	305	10,4	51,2
1961	40,0	319	10,5	51,5
1962	41,0	326	10,6	52,0
1963	44,0	369	11,2	52,4
1964	47,0	422	12,3	53,5
1965	48,0	426	12,2	54,0
1966	51,0	466	12,4	54,9
1967	51,5	444	11,3	55,8
1968	51,5	447	11,2	56,0
1969	52,0	468	11,4	56,5
1970	56,0	519	12,1	58,0
1971	61,0	572	12,7	59,0
1972	65,0	615	13,3	60,0
1973	66,0	626		60,8
1974	69,0	654	13,8	62,0
1975	67,0	627	12,7	63,0
1976	69,0	642	13,2	64,0
1977	72,0	690	13,6	64,5
1978	72,0	753	14,5	65,0
Figure dans le texte	9.2	9.3	9.3	9.4

Année	Charge moyenne	Tonnes-milles/ locomotive	Nombre de locomotives	Tonnes-milles/ mille de voies exploitées	Milles de voies exploitées
	(tonnes)	(en millions)		(en millions)	(en milliers)
1945	32,8	14,4	4 300	1,09	56,9
1946	30,0	12,4	4 350	0,95	57,0
1947	30,4	13,4	4 400	1,18	50,0
1948	30,3	12,9	4 500	1,02	57,0
1949	29,8	11,0	5 000	0,95	57,8
1950	29,1	10,8	5 100	0,95	58,0
1951	30,8	13,5	4 650	1,08	58,2
1952	31,9	14,1	4 750	1,15	58,3
1953	31,4	13,3	4 800	1,09	58,7
1954	30,7	12,0	4 750	0,97	58,8
1955	30,6	13,0	4 700	1,03	59,3
1956	32,1	15,2	4 735	1,20	59,8
1957	31,7	13,5	4 725	1,08	59,1
1958	32,5	13,1	4 750	1,04	59,3
1959	31,7	13,2	4 700	1,03	60,3
1960	31,7	16,0	3 750	1,01	59,2
1961	32,7	17,2	3 550	1,04	58,8
1962	33,1	17,7	3 500	1,05	58,8
1963	35,2	20,6	3 350	1,18	58,5
1964	36,7	24,0	3 250	1,34	58,2
1965	36,8	24,6	3 250	1,37	58,2
1966	38,7	27,1	3 250	1,51	58,1
1967	39,3	25,8	3 250	1,44	58,5
1968	39,4	25,8	3 250	1,43	58,7
1969	39,7	27,1	3 250	1,49	59,1
1970	42,7	29,3	3 350	1,64	59,6
1971	44,1	31,0	3 450	1,79	59,7
1972	46,4	31,9	3 600	1,92	60,0
1973	47,6	31,2	3 748	1,94	60,2
1974	47,5	32,3	3 870	2,08	60,2
1975	49,2	30,5	3 963	2,02	60,0
1976	48,7	31,0	3 994	2,07	59,3
1977	50,8	32,1	4 021	2,19	59,0
1978	51,8	33,8	4 057	2,34	58,5
Figure dans le texte	9.4	9.5	9.5	9.6	9.6

Année	Charge moyenne (tonnes)	Tonnes-milles/ locomotive (en millions)	Nombre de locomotives	Tonnes-milles/ mille de voies exploitées (en millions)	Milles de voies exploitées (en milliers)
1945	32,8	14,4	4 300	1,09	56,9
1946	30,0	12,4	4 350	0,95	57,0
1947	30,4	13,4	4 400	1,18	50,0
1948	30,3	12,9	4 500	1,02	57,0
1949	29,8	11,0	5 000	0,95	57,8
1950	29,1	10,8	5 100	0,95	58,0
1951	30,8	13,5	4 650	1,08	58,2
1952	31,9	14,1	4 750	1,15	58,3
1953	31,4	13,3	4 800	1,09	58,7
1954	30,7	12,0	4 750	0,97	58,8
1955	30,6	13,0	4 700	1,03	59,3
1956	32,1	15,2	4 735	1,20	59,8
1957	31,7	13,5	4 725	1,08	59,1
1958	32,5	13,1	4 750	1,04	59,3
1959	31,7	13,2	4 700	1,03	60,3
1960	31,7	16,0	3 750	1,01	59,2
1961	32,7	17,2	3 550	1,04	58,8
1962	33,1	17,7	3 500	1,05	58,8
1963	35,2	20,6	3 350	1,18	58,5
1964	36,7	24,0	3 250	1,34	58,2
1965	36,8	24,6	3 250	1,37	58,2
1966	38,7	27,1	3 250	1,51	58,1
1967	39,3	25,8	3 250	1,44	58,5
1968	39,4	25,8	3 250	1,43	58,7
1969	39,7	27,1	3 250	1,49	59,1
1970	42,7	29,3	3 350	1,64	59,6
1971	44,1	31,0	3 450	1,79	59,7
1972	46,4	31,9	3 600	1,92	60,0
1973	47,6	31,2	3 748	1,94	60,2
1974	47,5	32,3	3 870	2,08	60,2
1975	49,2	30,5	3 963	2,02	60,0
1976	48,7	31,0	3 994	2,07	59,3
1977	50,8	32,1	4 021	2,19	59,0
1978	51,8	33,8	4 057	2,34	58,5
Figure dans le texte	9.4	9.5	9.5	9.6	9.6

POOR

QUALITY

ORIGINAL